



Utilisation des ondes de surface pour l'auscultation des structures en génie civil : application à la caractérisation des fissures de surface

Grégoire Hévin

► To cite this version:

Grégoire Hévin. Utilisation des ondes de surface pour l'auscultation des structures en génie civil : application à la caractérisation des fissures de surface. Géophysique [physics.geo-ph]. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 1998. Français. NNT : . tel-00709828

HAL Id: tel-00709828

<https://theses.hal.science/tel-00709828>

Submitted on 19 Jun 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



**UNIVERSITE JOSEPH FOURIER – GRENOBLE I
SCIENCES & GEOGRAPHIE**

THESE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE JOSEPH FOURIER

Discipline : Géophysique

Présentée et soutenue publiquement

par

Grégoire HEVIN

le 29 octobre 1998

**UTILISATION DES ONDES DE SURFACE
POUR L'AUSCULTATION DES STRUCTURES EN GENIE CIVIL :
APPLICATION A LA CARACTERISATION DES FISSURES
DE SURFACE**

Directeur de thèse : Michel CAMPILLO

COMPOSITION DU JURY :

Mlle O. ABRAHAM
M. M. CAMPILLO
M. Ph. COTE
M. M. FRAPPA
M. D. JONGMANS
Mlle H. A. PEDERSEN

Ingénieur des TPE au LCPC,
Professeur à l'UJF,
Directeur de recherches au LCPC,
Maître de conférence à l'Université de Bordeaux,
Chargé de cours à l'Université de Liège,
Maître de conférence à l'UJF.

Univ. J. Fourier - O.S.U.G.
MAISON DES GEOSCIENCES
DOCUMENTATION
B.P. 53
F. 38041 GRENOBLE CEDEX
Tél. 04 76 83 54 27 - Fax 04 76 51 40 58
Mail : ptalour@ujf-grenoble.fr

19 AOÛT 2003

**UNIVERSITE JOSEPH FOURIER – GRENOBLE I
SCIENCES & GEOGRAPHIE**

THESE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE JOSEPH FOURIER

Discipline : Géophysique

Présentée et soutenue publiquement

par

Grégoire HEVIN

le 29 octobre 1998

**UTILISATION DES ONDES DE SURFACE
POUR L'AUSCULTATION DES STRUCTURES EN GENIE CIVIL :
APPLICATION A LA CARACTERISATION DES FISSURES
DE SURFACE**

Directeur de thèse : Michel CAMPILLO

COMPOSITION DU JURY :

Mlle O. ABRAHAM
M. M. CAMPILLO
M. Ph. COTE
M. M. FRAPPA
M. D. JONGMANS
Mlle H. A. PEDERSEN

Ingénieur des TPE au LCPC,
Professeur à l'UJF,
Directeur de recherches au LCPC,
Maître de conférence à l'Université de Bordeaux,
Chargé de cours à l'Université de Liège,
Maître de conférence à l'UJF.

10202044

*A Lucile et Louison,
pour leur patience et leur soutien,
Ce rapport saura-t-il les convaincre
que ce n'était pas vain ?*

UTILISATION DES ONDES DE SURFACE POUR L'AUSCULTATION DES STRUCTURES EN GENIE CIVIL : APPLICATION A LA CARACTERISATION DES FISSURES DE SURFACE.

Dans le domaine du génie civil, la demande en matière de contrôle non destructif est croissante. Les ondes de surface, et de Rayleigh en particulier, présentent différentes propriétés intéressantes pour l'auscultation de la surface des structures en béton. L'objectif de ce travail est de proposer et d'évaluer une méthode de caractérisation des fissures de surface par les ondes de Rayleigh.

La diffraction des ondes de Rayleigh par une fissure de surface est modélisée par la méthode indirecte d'éléments de frontière (IBEM pour Indirect Boundary Element Method). Les résultats permettent une analyse fine des différents phénomènes de diffraction et l'élaboration d'une méthode spectrale de détermination de la profondeur des fissures. Des dispositifs et procédures de traitement prenant en compte les effets de la source et des capteurs permettent de l'appliquer expérimentalement. La comparaison des données numériques et expérimentales sur des fissures artificielles de différentes profondeurs valide la méthode.

Elle est alors appliquée à des cas particuliers (fissures remplies d'eau, fissures présentant des contacts entre les deux lèvres) et comparée à une méthode temporelle utilisant les ondes de volume. Les résultats montrent clairement la complémentarité des deux méthodes pour un faible surcoût de mise en oeuvre. Leur application à des cas de fissuration réelle sur ouvrage d'art confirme leur complémentarité pour de véritables conditions d'auscultation.

THE USE OF SURFACE WAVES FOR NON-DESTRUCTIVE TESTING IN CIVIL ENGINEERING : APPLICATION TO THE CHARACTERISATION OF SURFACE CRACKS.

There is a increasing need for non destructive testing applied to concrete civil works. The use of surface waves, especially Rayleigh waves, fulfill many requirements to assess near surface of concrete structures because they are particularly energetic and sensitive to the surface state.

The present work proposes and evaluates a method based on Rayleigh waves for the characterisation of surface cracks. The diffraction of R-waves by a surface crack is modelled with the Indirect Boundary Element Method (IBEM) to obtain the synthetic respons to an impulse input. The results make it possible to understand the diffraction pattern and to design a spectral analysis method for the determination of the crack depth. For the validation of the method on observed data, an experimental setup is developed and a data processing method is elaborated to eliminate source and receiver effects. The comparison of theoretical and experimental data on artificial cracks of different depths in concrete slabs shows that the method is reliable for these simple geometries.

The method is then applied to special cases (water filled cracks, cracks with a point contact at different depths) and compared to the results obtained by the body waves transmission time method. The two methods show to be complementary, with a low experimental additional cost. They are finally carried out on a real cracks where it is confirmed they provide complementary information for the characterisation of cracks.

Liste des principales notations utilisées

A_{ij}	amplitude spectrale du signal expérimental
D	Durée d'un signal temporel
df	pas d'échantillonnage en fréquence ($= 1/D$)
dt	pas d'échantillonnage en temps
E	module d'Young
f	fréquence de l'onde considérée
f_c	fréquence de coupure
F_{CR}	fréquence centrale d'une impulsion de Ricker
F_{max}	fréquence d'échantillonnage
G_{ij}	fonction de Green en déplacement
H ou h	profondeur de tranchée ou de fissure
L_R	longueur d'onde de Rayleigh
m	masse
Q	facteur de qualité
t	temps
$t_i(x)$	traction
T	période de l'onde considérée
T_{ij}	fonction de Green de traction
U_{ij}	fonction réponse du milieu
$u_i(x)$	déplacement
V_P, V_S, V_R	vitesse des ondes P, S et Rayleigh.
V_ϕ, V_g	vitesse de phase, vitesse de groupe
x, y, z	variable d'espace en coordonnées cartésiennes
λ	longueur d'onde
λ_c	longueur d'onde de coupure
μ	module de cisaillement
ν	Coefficient de Poisson
ρ	densité
ϕ	déphasage
ψ_i	densité de force

Table des matières

Introduction.....	1
Chapitre 1 - Elément de théorie et état de l'art.....	3
1.1 - Propagation des ondes sismiques.....	3
1.1.1 Les ondes de volume.....	3
1.1.2 Les ondes de surface.....	5
1.2 - Ondes de Rayleigh.....	5
1.2.1 Mouvement particulaire et vitesse de propagation.....	5
1.2.2 Caractéristiques énergétiques.....	7
1.2.3 Intérêts des ondes de Rayleigh pour l'auscultation géophysique.....	8
1.3 - Ondes de Rayleigh et auscultation : état de l'art.....	9
1.3.1 Utilisation des ondes de Rayleigh en physique du globe.....	9
1.3.2 Auscultation de la subsurface par les ondes de Rayleigh pour le génie civil.....	10
1.3.3 Etude sur les tranchées d'isolation.....	16
1.3.4 Auscultation ultrasonique des matériaux.....	19
1.3.4.a Auscultation de volumes.....	19
1.3.4.b Auscultation de surfaces par les ondes de volume.....	21
1.3.4.c Auscultation de surfaces par les ondes de Rayleigh.....	23
1.4 - Conclusions.....	26

Univ. J. Fourier - O.S.U.G.
 MAISON DES GEOSCIENCES
 DOCUMENTATION
 B.P. 53
 F. 38041 GRENoble CEDEX
 Tél. 04 76 63 54 21 - Fax 04 76 51 40 58
 Mail : plalour@ujf-grenoble.fr

19 AOÛT 2003

Chapitre 2- Modélisation numérique de la propagation des ondes.....	31
2.1 - Enjeux et objectifs de la modélisation numérique.....	31
2.1.1 Domaines d'application des méthodes de modélisation numérique.....	31
2.1.2 Objectifs de la modélisation pour l'auscultation par les ondes de Rayleigh.....	33
2.1.3 Modélisation numérique et fissures de surface.....	33
2.2 - IBEM : Eléments théoriques et description.....	35
2.2.1 Introduction.....	35
2.2.2 Formules de bases.....	36
2.2.3 Discrétisation et intégration.....	38
2.3 - Simulation de la propagation d'une onde de Rayleigh sur une fissure de surface :	
application de la méthode.....	40
2.3.1 Description du modèle.....	40
2.3.2 Problèmes liés à la troncature du modèle.....	42
2.3.3 Premiers résultats.....	44
2.3.3.a Mise en forme des sismogrammes.....	44
2.3.3.b Interprétation.....	46
2.4 - Conclusion.....	50
 Chapitre 3 - Propagation d'une onde de Rayleigh sur une fissure de surface :	
mise en oeuvre expérimentale.....	53
3.1 - Description et justification du choix du matériel.....	53
3.1.1 Le matériel expérimental.....	53
3.1.1.a Instrumentation pour l'acquisition.....	54
3.1.1.b La source.....	57

3.1.2 Le site expérimental.....	61
3.1.2.a La dalle d'essai n°1.....	61
3.1.2.b La dalle d'essai n°2.....	64
3.2 - Dispositif expérimental et traitements préliminaire des signaux.....	70
3.2.1 Le dispositif expérimental.....	70
3.2.2 Sommation, filtrage et corrections.....	71
3.2.3 Résultats.....	72
3.3 - Conclusion.....	74
 Chapitre 4 - Méthodes d'évaluation de la profondeur de pénétration des fissures	
de surface.....	77
4.1 - Analyse spectrale des différents trains d'ondes diffractés par la fissure.....	77
4.2 - Méthode d'analyse spectrale.....	81
4.2.1 Principe.....	81
4.2.2 Localisation de la fréquence de coupure, évaluation de la profondeur	
de pénétration des fissures.....	85
4.2.3 Influence de l'épaisseur de la fissure.....	88
4.3 - Application aux données expérimentales.....	95
4.3.1 Traitements spécifiques.....	95
4.3.2 Rapports spectraux et fréquences de coupure.....	97
4.4 - Comparaison avec la méthode temporelle d'auscultation sonique.....	103
4.4.1 Rappel du principe de la méthode.....	103
4.4.2 Premiers tests et traitements des données.....	105
4.4.3 Application aux fissures artificielles de la dalle n°2.....	106
4.5 - Conclusion.....	109

Chapitre 5 - Applications à des cas particuliers de fissuration artificielle.....	111
5.1 - Fissures remplies d'eau.....	111
5.1.1 Pourquoi étudier le cas des fissures remplies d'eau.....	111
5.1.2 Auscultation par la méthode spectrale.....	112
5.1.3 Auscultation par la méthode temporelle.....	116
5.1.4 Conclusion.....	118
5.2 - Fissures avec contacts.....	119
5.2.1 Intérêts de la fissure présentant des contacts.....	119
5.2.2 Etude numérique de l'influence des contacts.....	120
5.2.2.a Analyse du phénomène.....	120
5.2.2.b Influence sur les courbes de rapports de spectres.....	122
5.2.3 Etude expérimentale de la fissure avec contact.....	129
5.2.3.a Construction de la fissure avec un contact.....	129
5.2.3.b Méthode temporelle.....	130
5.2.3.c Méthode spectrale.....	131
5.2.4 Conclusion.....	132
5.3 - Conclusion.....	133
 Chapitre 6 - Auscultation d'une fissure réelle sur un ouvrage d'art.....	135
6.1 - Présentation de l'ouvrage.....	135
6.2 - Mise en oeuvre expérimentale.....	137
6.2.1. Adaptation de la source aux conditions de surface.....	137
6.2.2. Adaptation fréquentielle de la source.....	138
6.3 - Auscultation de la fissure.....	139
6.3.1. Méthode temporelle.....	139
6.3.2. Méthode spectrale.....	141
6.4 - Conclusion.....	148

Conclusion.....	151
Références bibliographiques - Liste alphabétique.....	155
Références bibliographiques - Liste thématique.....	161
Annexe.....	167

Introduction

Introduction

Comme son nom l'indique, la géophysique est une science de la Terre. Son objet est la reconnaissance indirecte du sous-sol. Ses applications vont de l'échelle du globe à celle du génie civil, soit de plusieurs milliers de kilomètres à quelques mètres. Le principe de la reconnaissance géophysique repose sur l'observation d'un phénomène physique qui a lieu dans le sous-sol et qui permet d'en reconstruire ses caractéristiques : propagation d'ondes sismiques ou électromagnétiques, variations du champ de pesanteur ou du champ magnétique terrestre... Le développement de la géophysique a autant permis d'améliorer les techniques de reconnaissance du sous-sol que la connaissance des phénomènes physiques qu'elle observe.

Dans le domaine du génie civil, le sol est un élément clé. La connaissance de ses caractéristiques est indispensable pour pouvoir assurer la stabilité de toute construction. Pour répondre aux questions des ingénieurs, la recherche en géophysique appliquée propose et développe des techniques adaptées à l'auscultation de la subsurface qui complètent efficacement les méthodes destructives (forages, carotages, mesures pénétrométriques,...).

On assiste actuellement à une évolution de la demande de l'auscultation du sous-sol vers celle des constructions déjà existantes. De nouveaux moyens sont mis en place pour développer des méthodes de contrôle non-destructif pour les structures du génie civil. Les connaissances théoriques des phénomènes de propagation d'ondes, les outils de modélisation, les techniques d'acquisition et de traitement de données, tous ces éléments de la recherche géophysique sont plus ou moins transférables à une échelle plus petite. La géophysique fournit des bases solides pour développer ces nouvelles techniques. C'est dans ce contexte que cette thèse a été réalisée.

L'utilisation des ondes sismiques de surface, et de Rayleigh en particulier, est désormais classique en géophysique. Par l'analyse du phénomène de dispersion, elles permettent notamment de caractériser la structure d'un sol en fonction du module de cisaillement. Du fait de leurs propriétés, les ondes de Rayleigh semblent bien adaptées à l'auscultation de l'état de surface d'un milieu. L'altération d'une structure

en béton est très souvent liée aux conditions climatiques qu'elle subit. L'auscultation de l'état de surface correspond à un besoin réel des constructeurs. Nous nous sommes attachés, pour notre part, à utiliser les ondes de Rayleigh pour la détection et la caractérisation des fissures ouvertes débouchant en surface. Notre projet est de mettre au point une méthode qui permette d'évaluer la profondeur de pénétration de ces fissures.

Ce rapport est présenté selon l'organisation du travail de recherche réalisé pendant la thèse. Une étude bibliographique a permis dans un premier temps de définir différents points théoriques et de préciser nos objectifs (**Chapitre 1**). Le travail de recherche s'est orienté selon deux directions : d'une part la modélisation numérique de la propagation d'une onde de Rayleigh sur une géométrie de fissure de surface par la méthode indirecte d'éléments de frontière (IBEM) (**Chapitre 2**) et d'autre part des essais sur un modèle expérimental de structure en béton avec des fissures artificielles (**Chapitre 3**). Ces deux axes de recherche, développés en parallèle, ont permis l'élaboration d'une méthode d'évaluation de la profondeur des fissures de surface. Cette méthode est comparée à une méthode classique d'auscultation sonore (**Chapitre 4**). Deux cas particuliers de fissures ont été étudiés : les fissures remplies d'eau et les fissures présentant un ou plusieurs contacts entre les deux lèvres (**Chapitre 5**). L'analyse de ces deux cas répond à des problèmes concrets de l'auscultation des structures, elle met également en évidence la complémentarité des deux méthodes. L'auscultation d'une fissure sur un ouvrage d'art a enfin permis de tester ces méthodes dans des conditions réelles d'utilisation (**Chapitre 6**).

Chapitre 1

Eléments de théorie et état de l'art

Chapitre 1

Eléments de théorie et état de l'art

1.1. PROPAGATION DES ONDES SISMIQUES.

1.1.1. Les ondes de volume.

De l'équation de la propagation des ondes¹, on démontre que seulement deux types d'ondes peuvent se propager dans un milieu infini, élastique, homogène et isotrope : les ondes de compression et les ondes de cisaillement. Ces ondes se caractérisent par leur vitesse et par leur mouvement particulaire relatif à la direction de propagation.

L'onde de compression (onde longitudinale, onde primaire ou onde P) induit une déformation volumique parallèle au sens de propagation. Les particules, au passage d'une onde P, subissent un cycle de compression-dilatation (Cf. Figure 1.1). Leur vitesse de propagation, établie à partir de l'équation de propagation, est :

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (\text{Eq. 1.1}),$$

avec λ, μ : les coefficients de Lamé (μ : module de cisaillement),
 ρ : la densité.

L'onde de cisaillement (onde transversale, onde secondaire ou onde S) correspond à une déformation en cisaillement c'est à dire perpendiculaire à la direction de propagation. On décompose classiquement l'onde S en deux polarisations : l'onde SV, dont le mouvement particulaire est contenu dans un plan vertical avec la direction de propagation et l'onde SH, dont le mouvement particulaire est perpendiculaire à celui de l'onde SV, dans un plan horizontal.

¹ Aki K., Richards P.G., 1980. Quantitative seismology, W.H. Freeman, San Francisco.

La vitesse des ondes S est :

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (\text{Eq. 1.2})$$

A partir de ces définitions, on remarque que V_p est toujours supérieure à V_s puisque toutes les grandeurs sont positives.

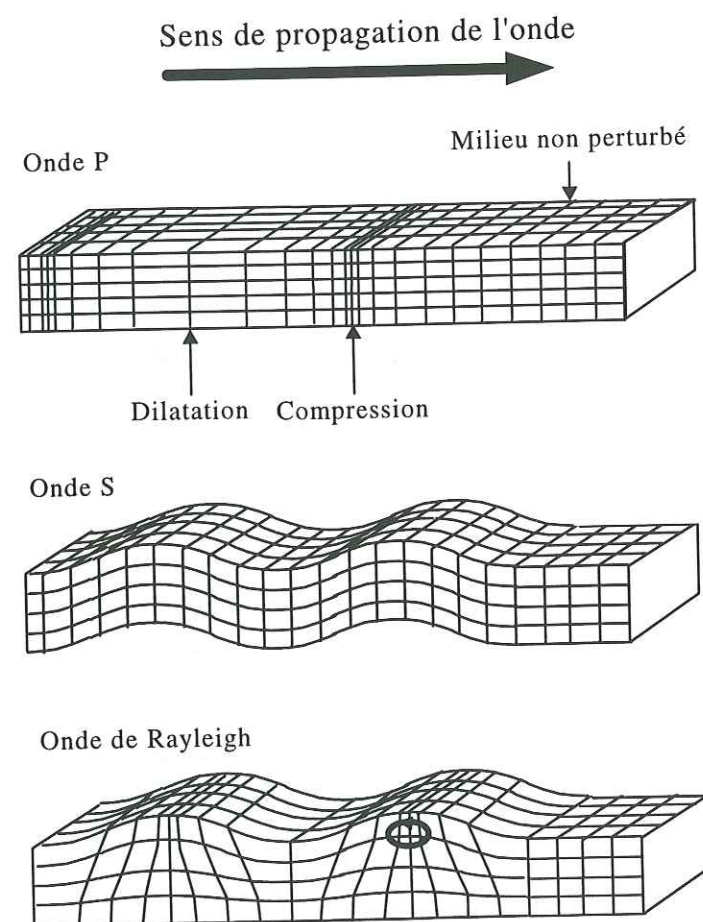


Figure 1.1 : Mouvements caractéristiques des ondes P, S et de Rayleigh

L'étude de la propagation de ces ondes a pour objectif, dans le cadre de la géophysique, de pouvoir distinguer et caractériser les différents milieux dans lesquels elles peuvent se propager. Les caractéristiques mécaniques de ces milieux, évaluées par les modules élastiques, sont directement reliées aux vitesses de propagation des ondes sismiques. Le module de cisaillement peut, par exemple, s'exprimer en fonction de la vitesse des ondes S par la relation :

$$\mu = \rho \cdot V_s^2 \quad (\text{Eq. 1.3})$$

Les vitesses des ondes de volume sont également reliées au coefficient de Poisson ν par :

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \quad \text{où } 0 < \nu < 0,5 \quad (\text{Eq. 1.4})$$

Le module d'Young peut être calculé avec μ et ν :

$$E = 2\mu(1 + \nu) \quad (\text{Eq. 1.5})$$

1.1.2. Les ondes de surface.

Dans le cas d'un demi-espace homogène, élastique, et isotrope ou d'une interface entre deux milieux homogènes et élastiques, on montre que d'autres types d'ondes peuvent se développer : ce sont les ondes de surface. Les deux principaux types d'ondes de surface sont les ondes de Rayleigh et les ondes de Love. D'autres types d'ondes existent également dans des cas de géométries plus particulières (interface liquide-solide,...). Toutes ces ondes n'existent que dans le cas d'un support physique tel qu'une surface ou une interface.

Une de leur spécificités est que leur amplitude décroît très rapidement avec la profondeur. Comme les ondes de volume, ces ondes se caractérisent par leur vitesse et le mouvement particulier qui leur est associé. L'onde de Love implique une déformation en cisaillement horizontal simple (perpendiculaire à la direction de propagation et parallèle à la surface). L'onde de Rayleigh est, quant à elle, polarisée dans un plan perpendiculaire à la surface.

1.2. LES ONDES DE RAYLEIGH.

1.2.1. Mouvement particulier et vitesse de propagation.

C'est Lord Rayleigh¹ qui le premier décrivit les ondes qui portent aujourd'hui son nom. Le mouvement particulier associé au passage d'une onde de Rayleigh à la surface d'un demi-espace homogène (Cf. Figures 1.1 et 1.2) est elliptique, polarisé

¹Rayleigh Lord J.W.S., 1887. *On waves propagated along the plane surface of an elastic solid*, Proceedings of the London Mathematical Society, vol. 17, pp 4 - 11.

verticalement et dans un sens rétrograde par rapport au sens de propagation. Ce mouvement peut être décomposé en deux polarisations : une composante cisailante verticale et une composante de compression. L'amplitude de la composante cisailante est la plus importante. Ce mouvement particulier évolue en fonction de la profondeur. A environ un tiers de la longueur d'onde, il devient un cisaillement vertical pur. Quand on descend en profondeur, l'onde de Rayleigh provoque un mouvement elliptique vertical prograde par rapport au sens de propagation, dont l'amplitude diminue rapidement. A une longueur d'onde de profondeur, l'amplitude ne représente plus que 20% de l'amplitude de surface.

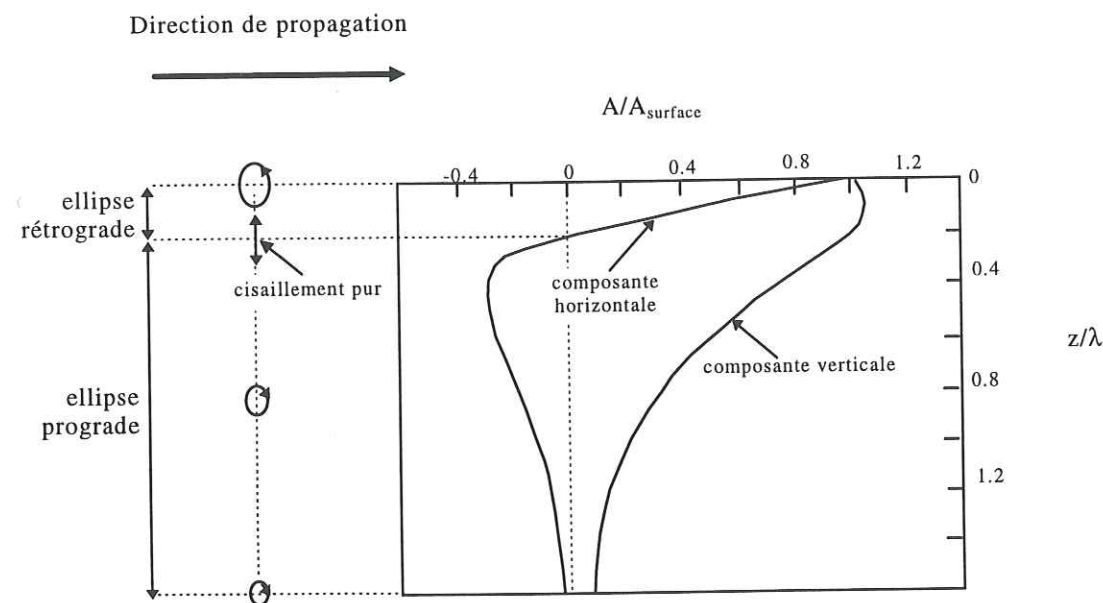


Figure 1.2 : Schéma du mouvement particulier et de l'amplitude de l'onde de Rayleigh en fonction de la profondeur (d'après Richart et al¹)

La vitesse des ondes de Rayleigh V_R est légèrement inférieure à celle des ondes S. Une approximation de V_R en fonction de V_S pour un demi-espace infini, homogène, isotrope, est donnée par la relation² :

$$V_R = \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu} V_S. \quad (\text{Eq. 1.6})$$

Suivant le coefficient de Poisson ($0 < \nu < 0,5$), le rapport de V_R sur V_S varie entre 0,87 et 0,95.

¹ Richart F.E., Hall J.R., Woods R.D., 1970. *Vibrations of soils and foundations* (Prentice Hall), Englewood Cliffs, New Jersey.

² Silk M.G., 1976. *The determination of crack penetration using ultrasonic surface waves*, Ultrasonics, NDT Int. December 1976, pp 290-297.

Dans un demi-espace infini homogène et élastique, la vitesse de propagation des ondes de Rayleigh est constante. Cependant dans le cas d'un milieu dont les caractéristiques mécaniques varient avec la profondeur, on observe que la vitesse V_R évolue en fonction de la fréquence f . C'est la dispersion :

$$V_R = u(f). \quad (\text{Eq. 1.7})$$

Le phénomène de dispersion s'explique par le fait que la profondeur de pénétration d'une onde de surface est liée à sa longueur d'onde. Ainsi les hautes fréquences se propagent en surface et ne sont affectées que par les caractéristiques superficielles du milieu. Inversement, les basses fréquences pénètrent le milieu en profondeur et leur propagation est affectée par les caractéristiques profondes du milieu.

En résolvant l'équation de propagation pour une onde de surface dans un milieu constitué de couches planes, horizontales, infinies latéralement, chacune homogène avec des caractéristiques mécaniques propres, on s'aperçoit que pour une fréquence donnée, il existe un nombre discret de vitesses de phase. On introduit ainsi la notion de mode. Le mode fondamental correspond à la solution qui existe dès les basses fréquences. Les modes supérieurs n'interviennent qu'à partir d'une fréquence limite que l'on peut déterminer pour chaque mode¹.

1.2.2. Caractéristiques énergétiques.

Les ondes de Rayleigh, du fait de leur comportement mécanique, présentent certaines caractéristiques énergétiques différentes des ondes de volume. Dans le cas d'une force appliquée en un point à la surface d'un demi-espace élastique homogène et isotrope, Miller et Pursey² ont montré que 67,4% de l'énergie transmise se propageait sous forme d'ondes de surface alors que seulement 25,8% se propagent sous forme d'ondes S et 6,9% sous forme d'ondes P.

De plus, les ondes de Rayleigh se propagent sur un front d'onde cylindrique. L'atténuation par expansion géométrique de ces ondes est donc moins importante que pour les ondes de volume (Cf. Figure 1.3). En effet, en surface, leur atténuation est

¹ Aki K., Richards P.G., 1980. *Quantitative seismology*, W.H. Freeman, San Francisco.

² Miller G.F., Pursey H., 1955. *On the partition of energy between elastic waves in a semi-infinite solid*, Proceedings of the Royal Society of London, Vol. 223, pp 55-69.

proportionnelle à $1/\sqrt{r}$ où r est la distance à la source. Dans le cas des ondes de volume¹, l'atténuation en surface est en $1/r^2$.

Les ondes de Rayleigh apparaissent donc comme particulièrement énergétiques et peu atténuées par expansion géométrique.

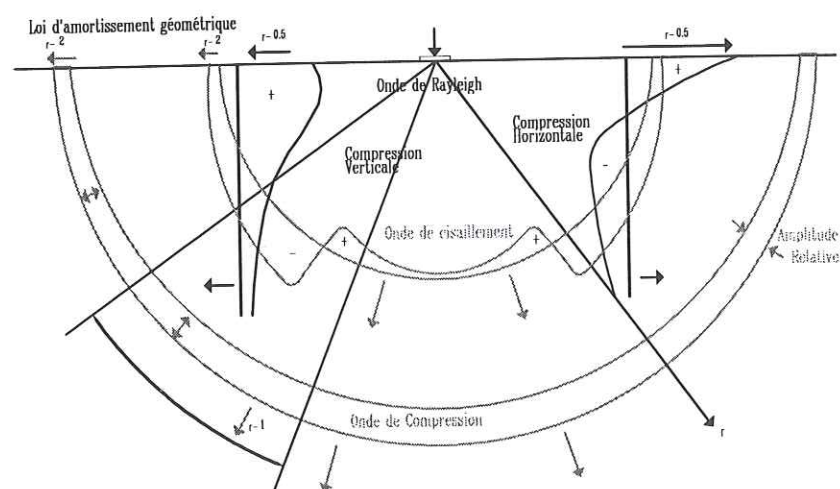


Figure 1.3 : Distribution des ondes mécaniques générées par une force ponctuelle à la surface d'un demi-espace homogène, isotrope et élastique (d'après Woods²).

1.2.3. Intérêts des ondes de Rayleigh pour l'auscultation géophysique.

Les caractéristiques mécaniques des ondes de Rayleigh présentent a priori différents intérêts pour l'auscultation géophysique.

Tout d'abord, la sensibilité des ondes sismiques aux variations mécaniques du milieu de propagation n'est plus à démontrer^{3,4}. Dans le cas des ondes de surface, les milieux échantillonnés sont proches de la surface (à l'échelle de la longueur d'onde).

Seul un accès à la surface auscultée est nécessaire pour l'étude puisque l'énergie se propage le long de cette surface. Dans le cas de l'étude du proche sous-sol, cela présente un intérêt évident puisque nous n'avons en général accès qu'à la surface.

¹Ewing W.M., Jardetsky W.S., Press F., 1957. *Elastic waves in layered media*, McGraw-Hill Book company, New York.

²Woods R.D., 1968. *Screening of surface waves in soils*, Journal of the Soil Mechanics and Foundations division, ASCE, vol. 94, n°SM4, Proc. 6031, july 68, pp 951-979.

³Aki K., Richards P.G., 1980. *Quantitative seismology*, W.H. Freeman, San Francisco.

⁴Parasnis D.S., 1986. *Principles of applied geophysics*, fourth edition, Sciences paperbacks, London.

Dans le cas de l'auscultation des structures en génie civil, c'est également un atout, les différentes faces d'une structure n'étant pas toujours accessibles (dalle semi-enterrée, tablier de pont, container hermétique...).

Les caractéristiques énergétiques laissent par ailleurs supposer que ces ondes sont "faciles" à générer puisqu'un impact sur la surface suffit pour qu'une grande quantité d'énergie se propage sous forme d'onde de Rayleigh. L'enregistrement de la déformation est d'autant plus aisé que l'énergie est importante. De plus, il existe une différence significative d'atténuation par expansion géométrique entre les ondes de Rayleigh et les ondes de volume. Cela devrait permettre de les distinguer facilement sur les enregistrements si la distance entre la source et le capteur est suffisante.

Enfin, la profondeur de pénétration étant directement reliée à la longueur d'onde, une analyse fréquentielle peut fournir des informations sur des variations en profondeur du milieu de propagation (analyse de la dispersion,...).

1.3. ONDES DE RAYLEIGH ET AUSCULTATION : ETAT DE L'ART.

Les ondes de Rayleigh ont longtemps été considérées comme incapables de donner des informations sur les structures internes des matériaux. En géophysique par exemple, l'intérêt que l'on y portait était surtout lié au fait qu'elles constituaient un signal parasite qu'il était souhaitable d'éliminer des enregistrements sismiques¹.

Aujourd'hui, leur utilisation est largement répandue en sismologie pour la reconnaissance des structures internes de la Terre. Dans le cadre du génie civil, l'étude des ces ondes s'est développée pour l'auscultation du proche sous-sol et des chaussées ainsi que dans le domaine de l'isolation sismique. A une échelle inférieure, le contrôle non destructif des matériaux par ultrasons propose l'utilisation de ces ondes pour la caractérisation de défauts de surface.

1.3.1. Utilisation des ondes de Rayleigh en physique du globe.

L'utilisation des ondes de Rayleigh dans le cadre de la géophysique est désormais classique^{2,3,4}. Elles peuvent fournir des informations sur les sources

¹Parasnis D.S., 1986. *Principles of applied geophysics*, fourth edition, Sciences paperbacks, London.

²Aki K., Richards P.G., 1980. *Quantitative seismology*, W.H. Freeman, San Francisco.

³Cara M., 1978. *Etude du manteau supérieur à partir des harmoniques des ondes de surface*, Thèse de l'Université Pierre et Marie Curie (Paris IV).

sismiques (mécanismes au foyer, moment sismique,...). Mais leur étude est surtout appliquée à la reconnaissance des structures internes de la Terre, de la croûte jusqu'au manteau supérieur. Pour cela on utilise le phénomène de dispersion. Avec le développement de la théorie des problèmes inverses, il est possible d'évaluer les variations des paramètres élastiques d'un terrain où se propagent des ondes de surface en fonction de la profondeur.

Les connaissances que la physique du globe a acquises sur les ondes de Rayleigh sont une base d'informations précieuse tant sur le plan théorique que sur les moyens de traitement et les techniques d'analyse. La complexité des milieux étudiés, le manque de contrôle sur les sources (séismes naturels), ont impliqué le développement de moyens d'études très complets. Ces principes ont été adaptés à différentes échelles jusqu'à celle de la prospection pour le génie civil^{1,2}. Les apports des sciences de la Terre pour l'auscultation par les ondes de Rayleigh ont donc une place privilégiée dans les différents domaines où elle s'applique.

1.3.2. Auscultation de la subsurface par les ondes de Rayleigh pour le génie civil.

Les premières techniques d'auscultation par les ondes de surface se sont développées dans les années 1950. Elles consistent à utiliser un vibreur monofréquentiel posé sur le sol et à déterminer la longueur d'onde émise avec deux géophones. La vitesse de phase V_ϕ qui est la vitesse de propagation de la phase de l'onde, peut alors être déterminée par la relation :

$$V_\phi = f \cdot L_R \quad (\text{Eq. 1.8})$$

où f est la fréquence et L_R la longueur de l'onde de Rayleigh.

En répétant l'opération pour différentes fréquences, on obtient une courbe des variations de V_ϕ en fonction de la longueur d'onde. Cette courbe est appelée courbe de dispersion. Elle contient certaines informations sur la variation des paramètres élastiques avec la profondeur, dans l'hypothèse d'un milieu constitué d'un empilement de couches horizontales. Néanmoins son interprétation reste délicate. Une première

⁴ Knopoff L., 1983. *The thickness of the lithosphere from the dispersion of surface waves*, Geophys. J. R. astr. Soc., Vol 74, pp 55-81.

¹ Jongmans D., Campillo M., Demanet D., 1990. *The use of surface wave inversion and seismic reflection methods for engineering applications*, Proceedings of the sixth Congress of the International Association of Engineering Geology, pp 10, Amsterdam.

² Jongmans D., Demanet D., Horrent C., Campillo M., Sanchez-Sesma F.J., 1996. *Dynamic soil parameter determination by geophysical prospecting in Mexico City : implication for site effect modelling*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 15, pp 549-559.

approche a consisté à établir une relation empirique entre la profondeur z de la couche et la longueur L_R de l'onde qui s'y propage :

$$z \approx \frac{L_R}{2} \quad \text{ou} \quad z \approx \frac{L_R}{3} \quad (\text{Eq. 1.9})$$

Par une approximation de la vitesse de phase de l'onde de Rayleigh et la vitesse des ondes S, on obtient ainsi un profil de V_s en fonction de la profondeur. Ces méthodes ont notamment été appliquées à l'auscultation des chaussées^{1,2}. Mais la lourdeur du dispositif expérimental ainsi que le manque de moyens d'interprétation précis n'ont pas permis à ces techniques de se développer directement sous cette forme.

Une méthode très similaire a été développée à l'Université du Texas à Austin. Il s'agit de la méthode Spectral Analysis of Surface Waves (SASW)^{3,4}. Cette méthode consiste également à calculer la vitesse de phase d'une onde de Rayleigh en fonction de la fréquence mais avec une source impulsionnelle. Pour cela, on détermine le déphasage ϕ (à 2π près) de deux signaux enregistrés à une distance d (Cf. Figure 1.4) par le calcul de la phase de l'interspectre des deux signaux. Il existe une relation entre le temps de propagation t de l'onde entre les deux capteurs et ce déphasage :

$$\frac{\phi}{2\pi} = \frac{t}{T} \quad (\text{Eq. 1.10})$$

où T est la période de l'onde considérée.

On en déduit :

$$t = \frac{\phi T}{2\pi} = \frac{\phi}{2\pi f} \quad (\text{Eq. 1.11})$$

¹ Bulletin de Liaison des Laboratoire Routier, 1968. Utilisation du vibreur Goodman en auscultation des chaussées, LCPC, ministère de l'équipement et du logement.

² Guillemin R., Gramsamer J.C., 1971. *Auscultation dynamique des chaussées à l'aide du vibreur léger*, Note d'info. technique, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

³ Heisey J.S., Stokoe II K.H., Hudson W.R., Meyer A.H., 1982. *Determination of in situ shear wave velocities from Spectral Analysis of Surface Waves*, Research report 256-2, Center for transportation research, the University of Texas at Austin.

⁴ Nazarian S., Stokoe II K.H., 1985 et 1986. *In situ determination of elastic moduli of pavements systems by Spectral Analysis of Surface Waves method : practical aspects and theoretical aspects*, Research reports 368-1F (1985) and 437-2 (1986), Center for transportation research, the University of Texas at Austin.

Si d est la distance séparant les deux capteurs, la vitesse des ondes de Rayleigh peut alors être calculée en fonction de la fréquence par la relation :

$$V_R = \frac{d}{t} = \frac{2\pi f d}{\phi} \quad (\text{Eq. 1.12})$$

On peut ainsi établir la courbe de dispersion comme précédemment mais avec l'utilisation de la source impulsionnelle, le processus expérimental est beaucoup plus léger. Le traitement des données brutes est aussi grandement simplifié par les progrès des outils de calcul. Parallèlement à ces améliorations, les moyens d'interprétation ont aussi évolué notamment avec le développement de l'inversion.

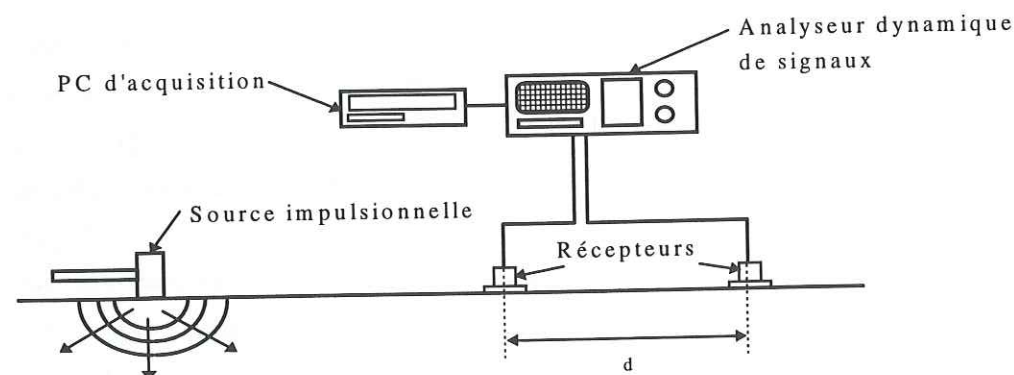


Figure 1.4 : Dispositif expérimental pour la méthode SASW (d'après Nazarian et Stokoe¹).

Le principe de l'inversion mathématique est simple. Afin de représenter les connaissances que nous avons de la réalité, nous pouvons établir un modèle constitué de paramètres théoriques. Une méthode de calcul peut être développée pour décrire les phénomènes physiques qui interviennent sur ce modèle. Les résultats ainsi calculés constituent la réponse au problème direct. Résoudre le problème inverse consiste à déterminer les paramètres qui définissent le modèle à partir de résultats mesurés. Pour cela, on résout le problème direct pour un modèle établi a priori. En comparant les résultats calculés avec les résultats mesurés, on peut ajuster les

¹Nazarian S., Stokoe II K.H., 1986. *In situ determination of elastic moduli of pavements systems by Spectral Analysis of Surface Waves method : theoretical aspects*, Research reports 437-2, Center for transportation research, the University of Texas at Austin.

paramètres du modèle initial. Un nouveau calcul permettra d'évaluer la pertinence des ajustements. Le problème inverse est considéré comme résolu quand les résultats calculés sont en adéquation avec les résultats mesurés. Cela implique un certain nombre de contraintes de formulation mais c'est une approche désormais classique, notamment en géophysique¹.

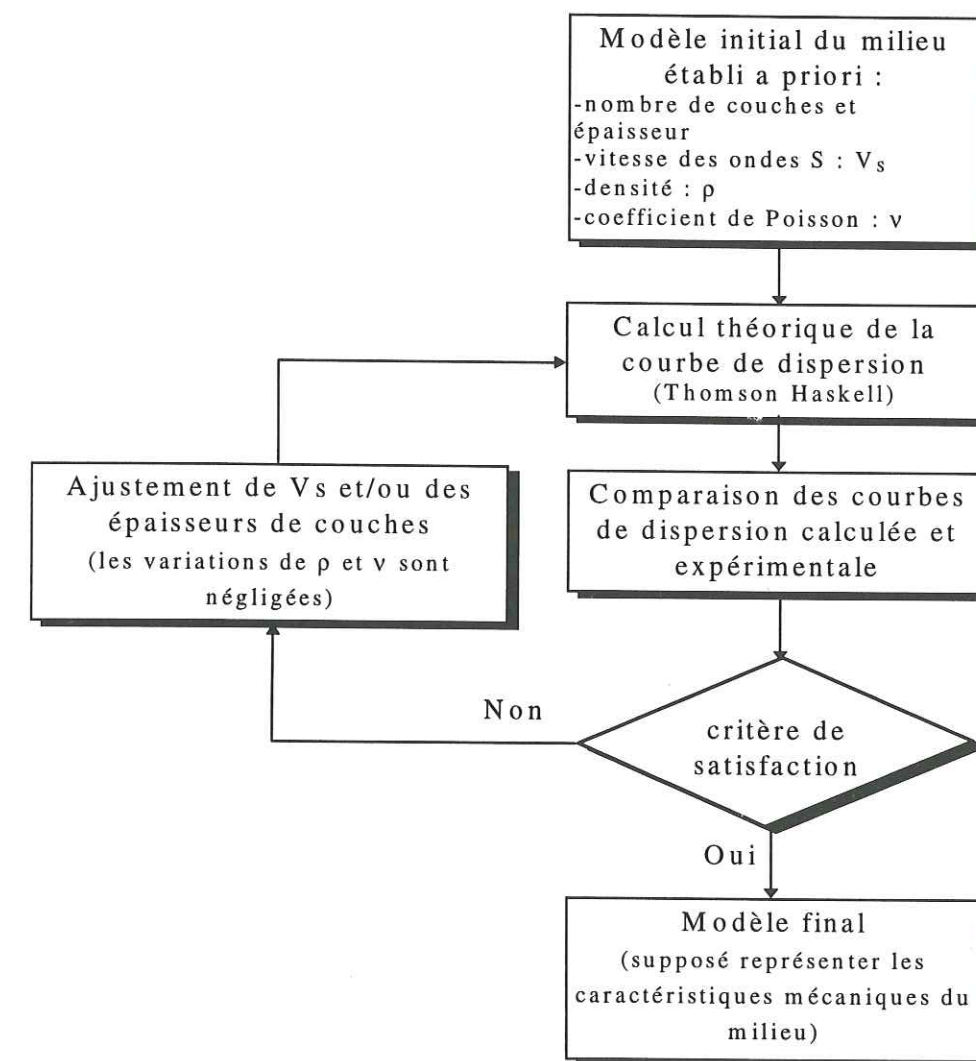


Figure 1.5 : Principe de l'inversion proposé par Rix et al² pour l'analyse de la dispersion des ondes de surface.

Dans le cadre de l'auscultation par les ondes de surface, les chercheurs de l'université d'Austin^{2,3} proposent une application de ce principe d'inversion à

¹Tarantola A., Valette B., 1982. *Inverse problems : quest of informations*, J. Geoph., vol. 50, pp 159-170.

²Rix G.J., Stokoe II K.H., Roesset J.M., 1991. *Experimental study of factors affecting the SASW method*, Research report 1123-5, Center for transportation research, the University of Texas at Austin.

³Nazarian S., Stokoe II K.H., 1985 et 1986. *In situ determination of elastic moduli of pavements systems by Spectral Analysis of Surface Waves method : practical aspects and theoretical aspects*, Research reports 368-1F (1985) and 437-2 (1986), Center for transportation research, the University of Texas at Austin.

l'analyse de la dispersion (Cf. Figure 1.5). La première étape consiste à établir à partir des données expérimentales une courbe de dispersion. On établit ensuite en posant des hypothèses, un modèle de milieu a priori. Classiquement, trois paramètres déterminent ce modèle synthétique : le nombre, l'épaisseur des couches horizontales et la vitesse des ondes S pour chaque couche. La rigidité et la densité peuvent également servir de paramètres de caractérisation. On calcule une courbe de dispersion théorique à partir de ce modèle par exemple par la méthode du propagateur matriciel de Thomson-Haskell¹. Les variations du coefficient de Poisson ν et la densité ρ sont négligées, leur influence sur la dispersion étant supposée faible par rapport à l'influence du paramètre V_s pour les variations réelles des milieux naturels. La courbe obtenue est ensuite comparée à la courbe expérimentale. On peut faire évoluer le modèle initial afin d'arriver à faire coïncider les deux courbes. Le premier modèle qui satisfait un critère de comparaison établi au préalable est supposé être proche du milieu expérimental.

Cette méthode a été appliquée à l'auscultation du proche sous-sol et des chaussées. Elle peut être en grande partie automatisée². La facilité de mise en oeuvre expérimentale ainsi que la simplicité des principes de traitement l'ont rendue assez attractive. Il faut néanmoins remarquer que si l'on s'en tient au processus décrit ci-dessus, certaines approximations peuvent conduire à des erreurs d'interprétation.

Tout d'abord l'hypothèse de tabularité du milieu est une hypothèse incontournable pour l'utilisation de la méthode de Thomson-Haskell. Elle est valable dans certains cas de structures géologiques (empilement de couches sédimentaires) dans les sols ainsi que pour les chaussées. Mais elle limite l'utilisation de la méthode à la caractérisation des variations verticales d'un milieu. En deuxième hypothèse, les ondes étudiées sont assimilées à des ondes planes en champ lointain alors que la source est très proche des capteurs. Les effets du champ proche sont négligés.

Une des conditions également nécessaire à l'utilisation de la méthode est que les signaux enregistrés par les deux capteurs doivent être suffisamment semblables et donc peu bruités. Pour satisfaire cette condition, Matthews et al³ proposent une solution expérimentale. Elle consiste à revenir à l'utilisation d'une source

¹Haskell N. A., 1953. *The dispersion of surface waves on multilayered media*, Bulletin of Seismological Society of America., Vol.43, pp 17-34

²Yuan D., Nazarian S., 1993. *Automated surface wave method inversion technique*, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 119, n°7, pp 1112-1127.

³Matthews M.C., Hope V.S., Clayton C.R.I., 1996. *The use of surface waves in the determination of ground stiffness profiles*, Proceedings of Instn Civ. Engrs Geotech. Engng, 119, Apr., pp 84-95.

monofréquentielle, en utilisant un pot vibrant dont la fréquence est contrôlée par un micro-ordinateur. Avec les progrès des moyens informatiques, l'utilisation du vibreur s'est largement améliorée. L'ordinateur commande une première fréquence, gère l'acquisition des signaux sur deux géophones et calcule le déphasage des signaux pour cette fréquence. Une fois l'acquisition correctement obtenue, il commande la fréquence suivante. La courbe est ainsi tracée point par point pour chaque fréquence émise par le vibreur. Le fait d'utiliser une source monofréquentielle permet de mieux contrôler le signal-source et d'améliorer de façon non négligeable la précision des résultats. Néanmoins le coût d'investissement pour des sources monofréquentielles n'est pas négligeable. Son adaptation à des échelles différentes pose également des problèmes expérimentaux.

Enfin cette méthode ne fonctionne que si le mode fondamental reste dominant sur toute cette gamme de fréquences. Comme on l'a vu précédemment, quand une source impulsionnelle génère une onde de Rayleigh dans un milieu stratifié, il existe un nombre discret de vitesses de phase pour une fréquence donnée. Le mode fondamental existe dès les basses fréquences, il correspond à la première vitesse de l'onde. Dans le cas d'une source superficielle, ce mode fondamental est en général dominant, c'est à dire que globalement l'onde se propage avec la vitesse correspondant à ce mode. Mais si, pour une fréquence supérieure, un autre mode devient dominant, les vitesses de phase mesurées correspondront à celles de cet autre mode. On pourra ainsi observer une variation de vitesse qui ne correspondra pas à un changement des propriétés mécaniques du milieu ausculté mais à un changement de mode dominant. Le dispositif expérimental classique de la SASW ne permet pas de vérifier à quel phénomène correspondent les variations observées, rendant alors possibles des erreurs d'interprétation. Selon Tokimatsu¹, pour un milieu dont la vitesse V_s augmente avec la profondeur, le mode fondamental reste dominant pour toutes les fréquences. Si par contre, les variations de vitesse sont irrégulières en fonction de la profondeur, l'influence des modes supérieurs ne peut plus être négligée.

La solution de ce problème consiste à identifier et à isoler les différents modes qui interviennent. On peut alors mesurer la dispersion de chaque mode séparément. Expérimentalement, cette technique exige un nombre de capteurs bien supérieur avec des longueurs de lignes beaucoup plus grandes (suivant le nombre de modes que l'on souhaite identifier). Les traitements permettent par contre une analyse très précise et, dans le cas où les modes sont correctement identifiés, l'interprétation est fiable.

¹Tokimatsu K., Tamura S., Kojima H., 1992. *Effect of multiple modes on Rayleigh wave dispersion characteristics*, Journal of Geotechnical Engineering, vol. 118, n°10, pp 1529-1543.

Une des techniques de séparation des modes, classiquement utilisée en physique du globe, consiste à établir une courbe de dispersion non pas de la vitesse de phase, mais de la vitesse de groupe par filtrage multiple et à séparer les différents modes dans le domaine temps-fréquence¹. La vitesse de groupe est la vitesse de propagation de l'énergie. Cette technique a également été développée à l'échelle du génie civil avec des résultats très positifs pour les sols^{2,3} et pour les chaussées^{4,5}.

Toutes ces méthodes se sont également perfectionnées en ce qui concerne les processus d'inversion en utilisant par exemple des modèles numériques par éléments finis⁶ ou en utilisant les algorithmes génétiques pour optimiser le processus⁷.

1.3.3. Etude sur les tranchées d'isolation.

Dans le but de protéger certains bâtiments fragiles ou certaines structures sensibles des nuisances des vibrations, plusieurs études ont été menées concernant l'isolation sismique de structures. L'origine des vibrations peut être naturelle (séisme) ou artificielle (explosion, machine, circulation de véhicules lourds,...). Suivant le type de sources et les longueurs d'ondes que l'on désire atténuer, différentes solutions ont été étudiées. Du fait de leur puissance énergétique, les ondes de surface y prennent une place importante.

Dans tous les cas, la solution la plus efficace reste le choix du site lorsque cela est possible. Deux critères doivent alors être pris en compte : la distance aux sources éventuelles de vibrations et la qualité "isolante" des matériaux du sol. La distance

¹ Dziewonski A.M., Hales A.L., 1972. *Numerical Analysis of dispersed seismic waves*, Methods in computational physics, vol. 11, pp 39-85.

² Jongmans D., Campillo M., Demanet D., 1990. *The use of surface wave inversion and seismic reflection methods for engineering applications*, Proceedings of the sixth Congress of the International Association of Engineering Geology, pp 10, Amsterdam.

³ Jongmans D., Demanet D., Horrent C., Campillo M., Sanchez-Sesma F.J., 1996. *Dynamic soil parameter determination by geophysical prospecting in Mexico City : implication for site effect modelling*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 15, pp 549-559.

⁴ Caprioli P., 1991. *Auscultation structurale des sols et des chaussées routières à partir de la propagation d'ondes mécaniques totalement ou partiellement guidées*, Thèse de l'Université Louis Pasteur (Strasbourg I).

⁵ Al Hunaidi M.O., 1994. *Analysis of dispersed multi-mode signals of SASW method using the multiple filter/crosscorrelation technique*, Journal of Soil Dynamics and Earthquake engineering, Vol. 13, n°1, pp 13-24.

⁶ Matthews M.C., Hope V.S., Clayton C.R.I., 1996. *The use of surface waves in the determination of ground stiffness profiles*, Proceedings of Instn Civ. Engrs Geotech. Engng, 119, Apr., pp 84-95.

⁷ Al Hunaidi M.O., 1997. *Evolution-based genetic algorithms for optimisation of nondestructive surface waves tests on pavements*, Proc. of NDT CE'97 conf., pp729-742

intervient dans le processus d'atténuation par expansion géométrique. La qualité "isolante" du milieu est reliée à l'atténuation intrinsèque. Elle dépend de la nature des matériaux mais aussi de son état d'altération et de la structure géologique¹.

Les autres solutions préconisent la construction d'écrans entre la source et la structure à isoler^{1,2,3,4}. Dans ce cadre, l'étude de l'influence d'une tranchée sur l'atténuation des ondes de Rayleigh s'est largement développée. Du fait de la similarité de géométrie entre une tranchée dans le sol et une fissure ouverte en surface sur un bloc de béton, certains résultats de ces études concernent directement notre problème. Ils ne peuvent cependant pas s'appliquer directement à cause de la différence d'échelle.

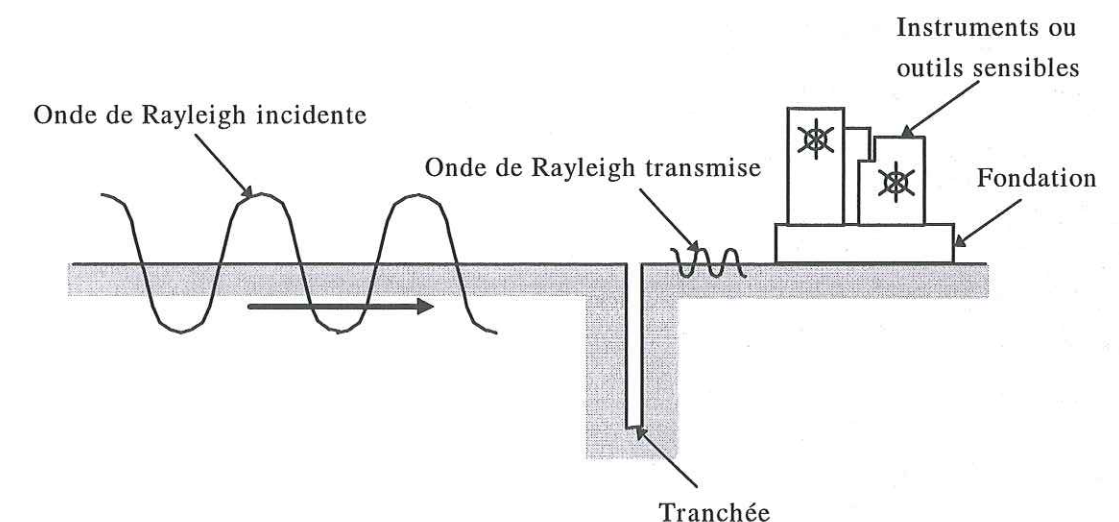


Figure 1.6 : Principe de l'isolation sismique par tranchée (d'après Woods⁵)

Le concept de l'isolation par des écrans est basé sur la réflexion, la diffraction et la réfraction de l'énergie. Le principe consiste donc à insérer sur le trajet des ondes un matériau avec des propriétés mécaniques différentes du milieu environnant

¹ Richart F.E., Hall J.R., Woods R.D., 1970. *Vibrations of soils and foundations* (Prentice Hall), Englewood Cliffs, New Jersey.

² Segol G., Lee P.C.Y., Abel J.F., 1978. *Amplitude reduction of surface waves by trenches*, Journal of the engineering mechanics division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, vol. 104, n°EM3, pp 621-641.

³ Fuyuki M., Matsumoto Y., 1980. *Finite difference analysis of Rayleigh wave scattering at a trench*, Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 70, n°6, pp 2051-2069.

⁴ Le Houedec D., Picard J., 1989. *Analyse de la réduction de la propagation des vibrations dans le sol au moyen de tranchées ou d'écrans*. Colloque Nat. AFPS, St-Remy-lès-Chevreuse (France), Avril 89.

⁵ Woods R.D., 1968. *Screening of surface waves in soils*, Journal of the Soil Mechanics and Foundations division, ASCE, vol. 94, n°SM4, Proc. 6031, July 68, pp 951-979.

(Cf. Figure 1.6). Plus le contraste est important, plus le coefficient de réflexion est grand¹. Dans le cas d'une transition solide-vide aucune onde n'est transmise directement au travers de la tranchée. Les amplitudes enregistrées derrière cet écran proviennent donc soit d'ondes diffractées sur les limites de la tranchée, soit d'ondes dont la longueur est supérieure à la taille de la tranchée et qui se propagent sous la tranchée (onde de Rayleigh), soit d'ondes réfléchies ou diffractées sur des hétérogénéités situées en profondeur. Les caractéristiques géométriques de la tranchée ont donc une influence importante sur l'isolation sismique.

En ce qui concerne l'atténuation des ondes de Rayleigh, l'efficacité de la tranchée est limitée par la profondeur de pénétration de l'onde. Si celle-ci est supérieure à la profondeur de la tranchée, l'écran ne sera pas efficace. Néanmoins une onde de Rayleigh s'atténue rapidement en profondeur. La majeure partie de l'énergie se propage à une profondeur inférieure à 1/3 de la longueur de l'onde considérée. La profondeur de la tranchée intervient donc directement sur la bande de fréquence qui sera atténuée. Elle est ainsi classiquement donnée en fonction de la longueur d'onde.

L'efficacité de la tranchée est souvent établie à partir de l'amplitude du mouvement vertical. Ce paramètre est mesuré avant et après l'installation de la tranchée. Le rapport des amplitudes indique la réduction obtenue. Dans le cas d'une tranchée circulaire encerclant une source sismique, Woods¹ estime que pour obtenir une atténuation de 25% à l'extérieur de la tranchée, la profondeur de tranchée doit être de l'ordre de 2/3 de la longueur d'onde ($H/L_R=0.6$). Il est intéressant de constater que dans le cas d'une tranchée rectiligne de longueur finie, le taux d'atténuation de 25% est atteint pour des profondeurs de tranchée beaucoup plus importantes ($H/L_R=1.33$). Fuyuki et Matsumoto² établissent à partir de modélisations numériques par différences finies de tranchées de longueur infinie des valeurs semblables ($H/L_R=0.5$) à celle de Woods pour une tranchée circulaire.

On remarquera que ces valeurs sont supérieures aux valeurs utilisées pour relier la profondeur de propagation d'une onde de Rayleigh et sa longueur d'onde ($0.5 < H/L_R < 0.3$). Il y a sans doute deux raisons à cela. D'une part on ne contrôle, dans ces études, que la profondeur de la tranchée pour atténuer l'amplitude verticale maximale enregistrée derrière la tranchée. L'augmentation de la profondeur de la tranchée ne permet que de limiter la transmission directe des ondes de Rayleigh. Or il

¹ Woods R.D., 1968. *Screening of surface waves in soils*, Journal of the Soil Mechanics and Foundations division, ASCE, vol. 94, n°SM4, Proc. 6031, July 68, pp 951-979.

² Fuyuki M., Matsumoto Y., 1980. *Finite difference analysis of Rayleigh wave scattering at a trench*, Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 70, n°6, pp 2051-2069.

intervient des phénomènes de diffraction des ondes de Rayleigh et de volume aux limites de la tranchée qui sont différents de cette transmission. L'atténuation des ondes de Rayleigh directement transmise est alors utilisée pour compenser l'apport d'énergie lié aux autres phénomènes de transmission. Il est donc nécessaire de surdimensionner cette profondeur. D'autre part, l'objectif de ces études étant l'atténuation des ondes, les valeurs peuvent être légèrement surestimées pour assurer un certain taux d'isolation.

On pourra noter les observations de Klein et al¹ établies à partir d'une modélisation numérique 3D par éléments de frontière (BEM). Pour une tranchée rectangulaire dont la profondeur est de l'ordre de $0,4L_R$ et la longueur de L_R , des phénomènes d'amplification des vibrations apparaissent. Cette amplification a lieu sur des zones très localisées, près de la tranchée. Cette influence négative de la tranchée doit sans doute être liée aux phénomènes de diffraction sur les extrémités de la tranchée mais aucune interprétation n'est donnée dans leur étude. Pour des fréquences plus hautes, une isolation de l'ordre de 25% est rapidement atteinte.

1.3.4. Auscultation ultrasonique des matériaux.

Le terme d'ultrason désigne les ondes acoustiques (ondes P) qui se développent dans une gamme de fréquences supérieures à la gamme de fréquences audibles c'est à dire au delà de 20 kHz. Par extension, on parlera d'ondes ultrasoniques en se référant à cette gamme de fréquences même pour des ondes de cisaillement ou de surface. La limite de 20 kHz entre les sons et les ultrasons est reliée à des considérations de perception humaine, elle ne représente pas une limite physique.

1.3.4.a. Auscultation de volumes.

L'auscultation ultrasonique s'est développée pour l'étude de nombreux matériaux. Elle présente l'avantage d'être réellement non destructive et permet, en plus de la mesure des paramètres élastiques, de détecter et de caractériser un certain nombre de défauts à l'intérieur même du matériau.

¹ Klein R., Antes H., Le Houedec D., 1997. *Efficient 3D modelling of vibration isolation by open trenches*, Computer & Structures, Vol. 64, n°1-4, pp 809-817.

La façon la plus courante d'utiliser les ondes mécaniques pour l'auscultation consiste à étudier les réflexions éventuelles de ces ondes sur les défauts^{1,2}. Cela implique que le défaut en question (vide, impureté,...) soit en contraste mécanique avec le matériau sain. On déplace en surface un capteur qui enregistre le mouvement (ou l'accélération) instantané et on génère une onde mécanique par un impact ou un émetteur (Cf. Figure 1.7). En mesurant les temps de propagation, l'énergie transmise et en estimant la vitesse de propagation des ondes dans le matériau étudié, on peut détecter et caractériser de façon très précise les défauts présents dans la masse du matériau, invisibles de l'extérieur. Les longueurs d'onde mises en jeu dépendent de la taille des défauts que l'on souhaite mettre en évidence et de l'amortissement des ondes dans le milieu. L'utilisation de longueurs d'onde plus petites améliore la résolution mais limite les distances de propagation du fait de l'atténuation.

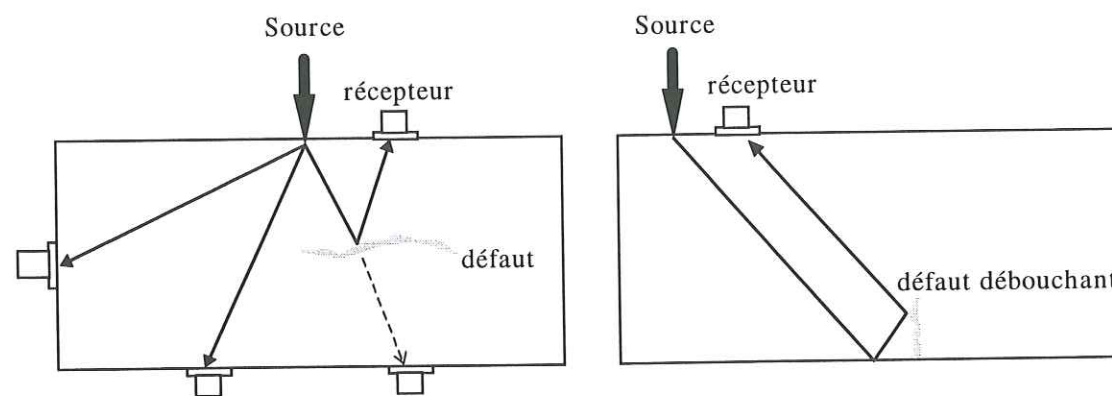


Figure 1.7 : Configurations de détection de défauts par l'utilisation des ondes de volume.

De nombreuses études ont ainsi été développées dans le domaine de l'auscultation des métaux. Les qualités mécaniques de ces matériaux représentent en effet des enjeux importants dans le domaine de la construction mécanique de haute technologie (centrale nucléaire, turbine, aérospatiale...). Etant donnée l'homogénéité générale des métaux, les méthodes ultrasonores apportent souvent des informations de très bonne qualité. L'échelle de travail de ce domaine et les particularités du matériau impliquent un appareillage expérimental très spécifique. La transposition de ces connaissances et des techniques utilisées à une échelle supérieure et pour un matériau comme le béton n'est pas toujours immédiate.

¹Perdijon J., 1993. *Le contrôle non destructif par ultrasons*, Traité des nouvelles technologies - Série matériaux.

²Ditchburn R.J., Burke S.K., Scala C.M., 1996. *NDT of welds : state of the art*, NDT&E International, Vol. 29, No. 2, pp. 111-117.

La tomographie sismique ou ultrasonique est une autre façon de procéder. Elle s'applique à de nombreux domaines, du génie civil à l'imagerie médicale. Son principe consiste à mesurer les temps de propagation d'un grand nombre de couples émetteur-récepteur autour d'un objet. En analysant les temps d'arrivée, on peut inverser les données et dessiner des cartes de vitesse en trois dimensions de l'objet ausculté¹. Dans le cadre du génie civil, l'intérêt de cette méthode est que la vitesse de propagation des ondes dépend notamment de l'état d'altération du milieu. Pour un même matériau, les zones de faible vitesse sont associées à des zones endommagées, les zones où la vitesse est forte sont associées aux zones saines. On peut ainsi caractériser l'objet dans son ensemble et localiser les zones plus fortement altérées².

Dans ces deux cas, les ondes utilisées sont souvent les ondes de compression. Comme le principe repose sur des mesures de temps, il est intéressant d'utiliser les ondes les plus rapides. Leurs arrivées ne sont pas masquées sur les enregistrements par les autres ondes ou par les réflexions, elles sont donc plus faciles à identifier. Dans le cas de détection de défauts par réflexion, il faut néanmoins se placer dans des conditions géométriques telles que les ondes de cisaillement, les ondes de surface ou les autres réflexions sur les bords extérieurs de l'objet, ne viennent pas perturber la mesure.

1.3.4.b. Auscultation de surfaces par les ondes de volume.

Du fait de leurs caractéristiques, les ondes de volume sont bien adaptées à l'auscultation des volumes. Pour contrôler l'état de surface d'un objet avec ces ondes, il est possible de travailler en réflexion si l'accès aux autres surfaces de l'objet est possible (Cf. Figure 1.7). Dans le cas contraire, on utilisera la diffraction de l'onde sur le défaut. La quantité d'énergie diffractée dépend des caractéristiques géométriques du défaut. Elle reste souvent plus faible que dans le cas d'une réflexion. Dans le domaine du contrôle non destructif, évaluer l'état de surface consiste à mesurer les défauts de planéité et à quantifier l'altération subie. La détection et la caractérisation de fissures ouvertes sur la surface y prennent donc une place importante.

¹Tarantola A., Valette B., 1982. *Inverse problems: quest of informations*, J.Geoph, vol.50, pp 159-170.

²Côte Ph., 1988. *Tomographie sismique appliquée au génie civil*, Thèse d'état. Université Joseph Fourier (Grenoble I).

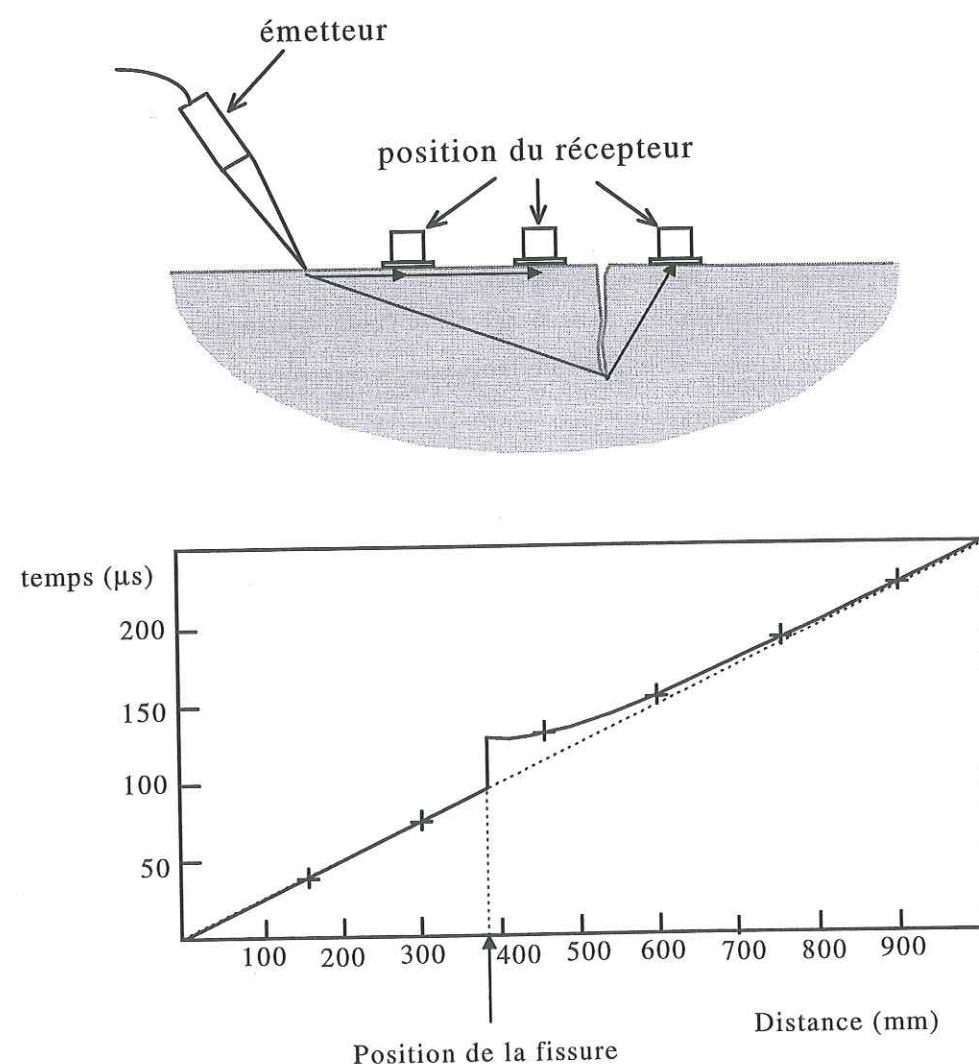


Figure 1.8 : Principe de détermination de la profondeur d'une fissure de surface par les ondes de volume (d'après le *British Standard*¹)

Une méthode classique de détection de fissures de surface¹ consiste à mesurer le temps d'arrivée d'une onde P diffractée par une fissure de surface. On émet une onde P à la surface de l'objet ausculté et on enregistre le temps t de la première arrivée en surface, à une distance x . En augmentant la distance, on peut obtenir plusieurs points de mesure et tracer une courbe de t en fonction de x . Si le milieu est homogène, la vitesse de l'onde P est constante. La courbe est une droite de pente $1/V_P$. Par contre, si une fissure de surface intervient entre l'émetteur et le récepteur, la transmission directe est interrompue. Le trajet le plus court effectué par l'onde P passe de la source à l'extrémité de la fissure. L'onde y est diffractée puis réémise vers le récepteur (Cf. Figure 1.8). Le temps de propagation correspondant est donc plus long. La

¹British Standard, 1986. *Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete*, Testing concrete, BS 1881 : Part 203 : 1986.

courbe $t(x)$ présente un décrochement par rapport à la droite théorique. Ce décrochement diminue ensuite quand x continue d'augmenter (et si aucune autre fissure n'intervient). Un calcul géométrique de la longueur du chemin parcouru permet d'évaluer la profondeur de la fissure.

Cette méthode est actuellement appliquée à l'auscultation des fissures de surface dans de nombreux matériaux^{1,2}. Smith et Crook² la considèrent comme la méthode la plus prometteuse pour la détection et la caractérisation des fissures de surface dans le béton.

Elle s'appuie sur au moins deux hypothèses. La première est que la fissure doit être ouverte. Si un contact entre les deux lèvres de la fissure existe, il permettra à l'onde mécanique d'être transmise à travers la fissure et cette dernière apparaîtra complètement transparente. C'est une condition sine qua non de l'utilisation des ondes mécaniques pour l'auscultation : une hétérogénéité qui ne présente pas de contraste de d'impédance mécanique avec le milieu environnant (en l'occurrence ici un contraste béton-air) est indétectable mécaniquement. Cette condition est très contraignante, surtout dans le cas de fissuration naturelle où les fissures refermées ou partiellement fermées sont probables. Néanmoins une caractérisation de la fissuration ouverte apporte une information importante et fiable. Elle est un élément de l'évaluation de l'état de surface.

La seconde condition nécessaire à l'auscultation par les ondes mécaniques est que le milieu soit assimilable à un milieu homogène pour les gammes de fréquences utilisées. Cela signifie que les longueurs d'ondes correspondantes doivent être d'un ordre inférieur à la taille caractéristique des défauts que l'on recherche. Si le milieu est constitué d'hétérogénéités dont la taille est du même ordre de grandeur que les longueurs d'ondes utilisées, l'énergie sera dispersée très rapidement. Les études de propagation ne pourront se faire que sur de très courtes distances.

1.3.4.c. Auscultation de surfaces par les ondes de Rayleigh.

L'influence d'une fissure de surface sur la propagation d'une onde de Rayleigh a été étudiée dans le domaine de l'auscultation non destructive des métaux. Différents

¹Ditchburn R.J., Burke S.K., Scala C.M., 1996. *NDT of welds : state of the art*, NDT&E International, Vol. 29, No. 2, pp. 111-117.

²Smith R.L., Crook M.J., 1989. *The non destructive detection and mapping of ASR cracking in concrete*, Transport and road research laboratory, 38 pp.

modèles de diffraction ont ainsi été proposés^{1,2,3,4,5}. On peut les résumer en établissant les différentes étapes caractéristiques du phénomène (Cf. Figure 1.9).

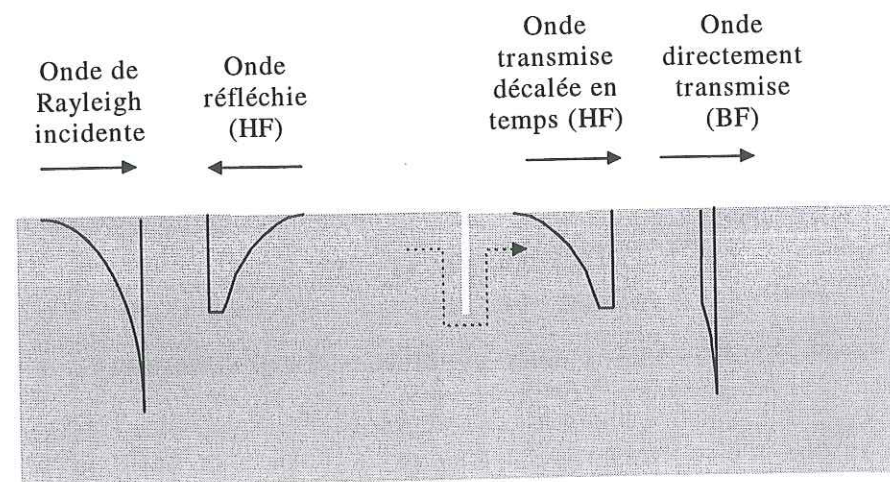


Figure 1.9 : Interprétation schématique de l'interaction d'une onde de Rayleigh avec une fissure de surface (d'après Burger et Testa³)

Tout d'abord, lorsqu'une onde de Rayleigh qui se propage à la surface d'un milieu, rencontre une fissure perpendiculaire au sens de propagation, celle-ci se comporte comme un réflecteur. Une partie de l'énergie va donc être réémise vers la source. Si l'onde incidente est composée d'une large bande de fréquences, le train d'ondes réfléchies sera plutôt composé de la partie haute fréquence qui se propage à une profondeur inférieure à celle de la fissure. Parallèlement, une partie de l'onde incidente va être directement transmise "sous" la fissure. Le contenu spectral de ces ondes va tendre vers les basses fréquences qui se propagent à une profondeur supérieure à celle de la fissure. Enfin un troisième train d'onde est identifiable, il correspond aux ondes qui suivent un chemin "autour" de la fissure. Comme les bords intérieurs de la fissure sont des surfaces libres, une onde de Rayleigh peut s'y développer. Une part de l'énergie va donc contourner la fissure et être transmise avec

un décalage de temps dû à l'allongement du trajet. Comme dans le cas de l'onde réfléchie, le contenu spectral de ce train d'ondes est plutôt haute fréquence. Il correspond aux ondes qui se propagent à des profondeurs inférieures à celle de la fissure.

Selon ce modèle, une fissure interagit avec une onde de Rayleigh comme un réflecteur, un filtre passe-bas, puis elle laisse passer un dernier train d'ondes, mais avec un décalage temporel. Deux critères peuvent permettre de caractériser la fissure en profondeur :

- la mesure du décalage en temps entre les deux trains d'ondes transmis. Ce décalage est dû à l'allongement du trajet de l'onde qui contourne la fissure. Si on néglige l'épaisseur de cette dernière, l'allongement correspond à deux fois la profondeur de la fissure. En mesurant par ailleurs la vitesse, on peut relier directement ce décalage en temps à la profondeur de la fissure.
- Une autre méthode consiste à analyser l'information spectrale contenue dans les différents trains d'ondes. La profondeur de la fissure peut être reliée à une fréquence de coupure entre l'onde directement transmise et l'onde réfléchie.

Burger et Testa¹ ont vérifié expérimentalement la validité de ce modèle de diffraction pour des fissures usinées dans des blocs de métal. Ils préconisent la méthode d'analyse spectrale pour évaluer la profondeur de la fissure mais utilisent également un fenêtrage en temps pour isoler les deux arrivées de l'onde transmise et mieux définir leur amplitude spectrale respective. La profondeur de la fissure est reliée à la fréquence maximale de l'onde directement transmise. Avec des essais sur plusieurs profondeurs de fissure, ils établissent expérimentalement une relation linéaire entre la profondeur de fissure et la longueur d'onde correspondant à la fréquence de coupure. Leur rapport est de l'ordre de 0,8 ($H/L_R=0,82$).

Ces expériences sont particulièrement intéressantes dans la mesure où les problèmes de la détection et de la caractérisation de la fissure sont effectivement traités. L'homogénéité du métal comme milieu de propagation ainsi que sa facilité d'usinage des surfaces permettent l'utilisation de pulses de très hautes fréquences. La résolution des signaux obtenus rend possible l'identification temporelle des différents trains d'ondes. Mais une adaptation directe de cette méthode à un matériau hétérogène comme le béton, à une échelle supérieure, présenterait a priori des difficultés expérimentales.

¹ Silk M.G., 1976. *The determination of crack penetration using ultrasonic surface waves*, Ultrasonics, NDT Int. December 1976, pp 290-297.

² Tittmann B.R., Cohen-Tenoudji F., de Billy M., Jungman A., Quentin G., 1978. *A simple approach to estimate the size of small cracks with the use of acoustic surface waves*, Appl. Phys. Lett., Vol 33, n°1, pp 6-8.

³ Burger C.P., Testa A., 1981. *Rayleigh wave spectroscopy to measure the depth of surface cracks*, Proceedings of the thirteenth symposium on non destructive evaluation, San Antonio TX, April 21-23.

⁴ Cooper J.A., Crosbie R.A., Dewhurst R.J., McKie A.D.W., Palmer S.B., 1986. *Surface acoustic wave interactions with cracks and slots : a noncontacting study using lasers*, IEEE Transactions on ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency control, Vol. UFFC-33, n°5, pp 462-470.

⁵ Imram I., Nazarian S., Picornell M., 1995. *Crack detection using time domain wave propagation technique*, Jr. Geotech. Eng., Vol 121, n°2, pp 198-207.

¹ Burger C.P., Testa A., 1981. *Rayleigh wave spectroscopy to measure the depth of surface cracks*, Proceedings of the thirteenth symposium on non destructive evaluation, San Antonio TX, April 21-23.

Dans le cadre de l'auscultation du béton par les ondes de Rayleigh, Bowen¹ et Kalinski² proposent une autre approche. Elle consiste en une adaptation de la méthode de SASW précédemment décrite, au cas de la détection de fissuration de surface. La méthode de SASW permet de mesurer la vitesse de phase de l'onde de Rayleigh. Selon Bowen, la présence de fissures ouvertes en surface affecte la vitesse de propagation de l'onde. Des chutes anormales de vitesse de propagation indiqueraient des zones fissurées en surface. Kalinski établit, selon ce principe, des cartes de vitesse pour des éléments en béton. Ces travaux sont prometteurs. On notera cependant l'influence du mode opératoire et, là encore, la difficulté expérimentale d'obtenir, sur du béton endommagé, des signaux suffisamment propres pour le calcul de la vitesse de phase.

1.4. CONCLUSION.

Les ondes de Rayleigh, de part leurs caractéristiques mécaniques, présentent différents avantages pour l'auscultation non destructive. Leur étude et leur utilisation se sont donc développées dans de nombreux domaines à des échelles allant de la reconnaissance des structures internes de la Terre jusqu'à l'auscultation micrométrique des matériaux. Ces études, suivant le domaine où elles sont appliquées, nous fournissent des informations précises, parfois un peu contradictoires (en ce qui concerne la profondeur de pénétration de l'onde de Rayleigh par exemple), mais souvent complémentaires. Nous disposons donc de bases théoriques sur le comportement de l'onde de Rayleigh suivant les caractéristiques du milieu dans lequel elle se propage (variations verticales de vitesse, atténuation, diffraction sur des défauts de surface,...). L'auscultation des structures en béton par les ondes de Rayleigh s'inscrit dans le cadre d'une extension des connaissances et des méthodes établies à des échelles supérieures ou inférieures. C'est en cela un enjeu intéressant et prometteur. Il implique de pouvoir développer des processus expérimentaux et des traitements adaptés à cette échelle et à ce type de matériau.

Nous avons choisi pour cette thèse de nous attacher plus particulièrement à la détection et à la caractérisation de fissures débouchant en surface. L'objectif est

¹ Bowen B.R., Roesset J.M., Stokoe II K.H., 1981. *Integrity testing of concrete elements using surface waves*, Proceedings of Engineering Mechanics, Publ. by ASCE, New York, USA, pp 925-955

² Kalinski M.E., Stokoe II K.H., Jirsa J.O., Roesset J.M., 1994. *Non destructive identification of internally damaged areas of concrete beam using the Spectral Analysis of Surface Waves method*. Transportation research record 1458, pp14-19.

d'évaluer les capacités réelles des ondes de Rayleigh à fournir des informations sur l'état de surface des structures en béton. Cela soulève plusieurs questions :

Qu'est-ce qu'une fissure ?

Suivant les domaines et le type du matériau étudié, le terme de fissure peut être associé à différentes définitions. De façon générale, on décrira une fissure comme une discontinuité mécanique de la matière. Cette fissure résulte de contraintes extérieures ou intérieures, supérieures à la résistance mécanique du matériau. Sa présence se traduit par une réduction de la résistance en traction et en cisaillement.

Dans le domaine des ouvrages d'art, on définit classiquement une fissure comme une ouverture linéaire dont la largeur est comprise entre 0,2 et 2mm¹. La fissure est dite de surface quand elle ne traverse pas l'épaisseur de la structure, elle est traversante lorsqu'elle est visible sur au moins deux faces de la structure, elle est aveugle lorsque les autres faces de la structure ne sont pas accessibles. Ces définitions sont littéraires et ne concernent que le domaine très précis des ouvrages d'art du génie civil. La définition d'une fissure est évidemment plus large que cela et, suivant les caractéristiques de chaque domaine, les échelles sont différentes. C'est pourquoi nous utiliserons dans ce rapport le terme de fissure sans considération particulière de largeur ou de longueur.

Dans le cadre de cette étude, le terme de fissure va également être relié à des critères d'interaction de la fissure avec des ondes mécaniques. Une fissure sera ainsi décrite comme une discontinuité de la matière présentant un contraste de paramètres élastiques (et donc de vitesse des ondes mécaniques) avec le matériau environnant. Il est clair que le contraste le plus fort sera obtenu pour une fissure ouverte c'est à dire remplie d'air. Néanmoins une fissure remplie d'un matériau présentant des caractéristiques mécaniques suffisamment différentes de celle du matériau environnant (eau, poussière,...) peut s'inclure dans cette définition. Si un contact mécanique existe entre les deux lèvres de la fissure (fissure refermée ou partiellement ouverte) les ondes pourront être transmises à travers la fissure, elle paraîtra invisible à toute méthode d'auscultation acoustique. Cette limite de la méthode nous oblige à restreindre notre définition de la fissure à cette notion de contraste d'impédance mécanique.

Ces définitions font appel à des notions différentes, mais les réalités qu'elles recouvrent sont très proches. La caractérisation des fissures définies par leur contraste d'impédance acoustique constitue donc une information réelle sur l'état de

¹ Norme Française NF P 95-103, 1993. *Ouvrage d'art - Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie - traitement des fissures et protection du béton - Spécifications relatives à la technique et aux matériaux utilisés*, AFNOR, pp 26.

fissuration classiquement défini. En cela, elle correspond aux critères d'investigation du contrôle non destructif des structures.

Comment déterminer la profondeur d'une fissure de surface ?

La méthode de détection des fissures par les ondes de volumes (Cf. §1.3.4.b) est très vite limitée en précision pour la détermination de la profondeur et dans le cas où la fissure est remplie par un matériau différent de l'air. Dans la mesure où nous pourrions le vérifier expérimentalement sur du béton, l'analyse du contenu spectral des différents trains d'onde de surface proposée par Burger et Testa¹ (Cf. §1.3.4.c.) semble être une approche intéressante. La difficulté consiste à établir le lien qui existe théoriquement entre la profondeur de la fissure et la longueur de l'onde de Rayleigh qui se propage sous la fissure. Suivant les domaines et la précision des méthodes, les valeurs de profondeur de pénétration de l'onde de Rayleigh mesurées s'inscrivent dans une fourchette allant de $1/3L_R$ à $1,2L_R$. Pour résoudre ce problème, une connaissance précise des phénomènes de diffraction d'une onde de Rayleigh sur une fissure de surface s'avère nécessaire.

L'hétérogénéité du béton n'est elle pas trop importante pour pouvoir développer des méthodes d'auscultation valables pour ce matériau ?

Ce problème est une limite pour notre méthode. Les hétérogénéités qui ont une taille caractéristique du même ordre de grandeur que la longueur de l'onde utilisée provoquent des diffractions multiples qui dispersent l'énergie. Cela limite les distances d'exploration et affecte la qualité des enregistrements. Le béton est, de ce fait, un matériau a priori mal adapté à une auscultation par des ondes mécaniques. Il est composé d'un mélange de ciment, de sable et de grave représentant toutes les granulométries entre 0 et 25 mm. Pour la résistance de l'ouvrage en cisaillement et en traction, des aciers sont souvent inclus (leur section étant de l'ordre du cm pour des longueurs allant jusqu'à quelques mètres). La taille caractéristique des défauts que l'on y recherche (vide, fissure,...) est en général très proche de la taille des hétérogénéités (de l'ordre de quelques centimètres). Les longueurs d'ondes utilisées doivent donc être comprises entre la taille des défauts recherchés et celle des éléments constitutifs du béton pour limiter l'absorption. Cette fourchette est relativement étroite. Néanmoins les ondes de Rayleigh permettent de l'élargir un peu puisqu'il est possible d'utiliser des ondes dont la longueur est jusqu'à 2 ou 3 fois supérieure à la taille du défaut recherché.

¹Burger C.P., Testa A., 1981. *Rayleigh wave spectroscopy to measure the depth of surface cracks*, Proceedings of the thirteenth symposium on non destructive evaluation, San Antonio TX, April 21-23.

Ce problème est avant tout expérimental. Une quantification théorique des différents transferts d'énergie qui se produisent lors de la diffraction de l'onde de Rayleigh sur une fissure de surface, pourrait permettre d'orienter les recherches vers les processus expérimentaux les plus favorables.

Ces questions étant posées, nous avons choisi, pour y répondre, d'orienter notre travail selon deux directions : l'adaptation d'un programme de modélisation numérique et la mise au point de tests sur site expérimental en béton. La modélisation devrait permettre de préciser nos connaissances des différents phénomènes qui interviennent lors de la diffraction d'une onde de Rayleigh sur une fissure de surface, de quantifier de façon théorique l'influence de ces phénomènes, de mesurer les valeurs mal déterminées et de tester les différentes méthodes envisageables pour déterminer la profondeur de fissure. Les mesures expérimentales permettront de vérifier la validité et de déterminer les limites des méthodes testées. A terme et suivant les résultats obtenus, une application à un cas de fissuration réelle sera envisagée.

Chapitre 2

Modélisation numérique de la propagation des ondes

Chapitre 2

Modélisation numérique de la propagation des ondes

2.1 ENJEUX ET OBJECTIFS DE LA MODELISATION NUMERIQUE.

Avec le développement des moyens informatiques, les outils d'analyse numérique deviennent de plus en plus performants. Ils ouvrent de nouveaux champs d'exploration scientifique. Dans le domaine de la géophysique, la modélisation numérique s'est avérée très vite être un outil indispensable à l'interprétation des données enregistrées en milieu naturel. Après l'observation des phénomènes physiques qui interviennent lors des mesures expérimentales, le principe consiste à décrire par le calcul les effets produits par ces phénomènes. On peut alors calculer l'influence de chacun d'eux pour des conditions particulières et comparer les données synthétiques obtenues avec les données enregistrées sur le terrain. A terme, les différentes caractéristiques du milieu ausculté peuvent être reconstruites.

Il est clair que la qualité des informations tirées d'un modèle numérique dépend des approximations faites pour décrire le milieu et de la capacité à prendre en compte et à modéliser les phénomènes. En cela, les outils de modélisation numériques sont aussi limités. Ils apportent cependant un complément utile à la palette des outils d'analyse classique.

2.1.1 Domaines d'application des méthodes de modélisation numérique.

Pour l'étude des ondes élastiques, il existe plusieurs méthodes d'analyse de la propagation. Aki et Richards¹ résument les différents domaines d'application de ces méthodes suivant les caractéristiques du milieu ausculté. Dans un milieu homogène, les équations de propagation permettent de décrire analytiquement le phénomène. Dans le cas où des hétérogénéités de petites tailles sont présentes dans le milieu, on peut assimiler ce dernier à un milieu homogène équivalent. La théorie des rais est une approximation qui s'applique à des milieux où la taille des hétérogénéités est grande

¹ Aki K., Richards P.G., 1980. *Quantitative seismology*, W.H. Freeman, San Francisco.

par rapport aux longueurs d'onde (empilement de couches,...). Il existe également des méthodes pour traiter le cas où les hétérogénéités sont peu nombreuses avec de faibles contrastes mécaniques (méthodes de perturbation) ou pour des modèles de grande taille avec des perturbations aléatoires traitées de manière stochastique. Néanmoins ces méthodes approchées sont vite limitées dès que la taille des hétérogénéités est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde. Dans ce cas, la diffraction des ondes est importante et les transferts d'énergie entre les différents types d'onde ne sont plus négligeables. Des solutions analytiques existent pour des géométries très particulières¹. Pour prendre en compte ces phénomènes et essayer de résoudre les problèmes que cela engendre, les méthodes numériques semblent être une voie très prometteuse. Avec le développement des moyens informatiques, les capacités de calcul augmentent considérablement, rendant accessible la modélisation de phénomènes de plus en plus complexes tout en améliorant la précision des résultats obtenus.

Durant les vingt dernières années, les méthodes de simulation de la propagation d'ondes en deux dimensions ont beaucoup progressé. On dispose actuellement de modélisation du champ sismique complet (voir ² pour un état de l'art). L'extension de ces simulations à des problèmes tridimensionnels reste encore très coûteuse en capacité de mémoire des ordinateurs et en temps de calcul. Pour des questions de géométrie liée à notre problème, la méthode que nous avons utilisée est en deux dimensions (2D). Elle a cependant été étudiée pour pouvoir être développée en quasi trois dimensions (3D). Elle permet en effet de simuler la propagation d'ondes en 3D pour des structures à géométrie 2D. En ce sens, on parle parfois de modélisation en 2,5D. Pour l'appliquer à notre recherche, nous nous sommes appuyés sur l'expérience déjà largement acquise au Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique. Nous avons adapté à notre problème, un code de modélisation numérique développé pour étudier l'influence de grandes structures géologiques (vallée, chaîne de montagne,...) sur la propagation des ondes sismiques^{3,4,5}.

¹ Trifunac, M.D., 1973. *Scattering of plane SH waves by semicylindrical canyon*. Int. J. Earthquake Eng. Struct. Dyn., 1: 267-281.

² Kelly, K.R. and Marfurt, K.J., 1990. *Numerical modeling of seismic wave propagation* (Geophysics Reprint series, N°13.) Soc. Explor. Geophys., Tulsa, Okla., USA.

³ Sanchez-Sesma F.J., Campillo, M., 1991. *Diffraction of P,SV and Rayleigh waves by topographic features : boundary integral formulation*. Bull. of Seism. Soc. of Am., Vol 81, No 6, pp 2234-2253.

⁴ Pedersen H.A., Sanchez-Sesma F.J., Campillo M., 1994. *Three-dimensional scattering by two-dimensional topographies*, Bull. Seism. Soc. Am. Vol 84, pp 1169-1183.

⁵ Pedersen H.A., Le Brun B., Hatzfeld D., Campillo M., Bard P.-Y., 1994. *Ground-motion amplitude across ridges*. Bull. Seism. Soc. Am., Vol 84, No 6, pp 1786-1800.

2.1.2 Objectifs de la modélisation pour l'auscultation par les ondes de Rayleigh.

L'objectif de l'utilisation d'un modèle numérique pour ce travail est double. Les premiers enregistrements expérimentaux que nous avons obtenus sur des structures en béton, nous sont apparus très bruités et difficilement analysables. Des signaux "propres" permettraient une meilleure connaissance théorique du comportement de l'onde de Rayleigh sur une fissure de surface afin de caractériser les différents phénomènes qui interviennent.

Le deuxième objectif est d'avoir des données théoriques utilisables de la même façon que les données expérimentales pour tester différentes méthodes de caractérisation de la profondeur de la fissure. La modélisation permet d'étudier l'influence d'un grand nombre de paramètres géométriques (profondeur de la fissure, épaisseur,...) et ce avec une grande souplesse de mise en oeuvre. Les capacités de chaque méthode pourront ainsi être évaluées avant l'application à des données réelles.

2.1.3 Modélisation numérique et fissures de surface.

Il existe de nombreuses méthodes de modélisation numérique pour étudier la propagation d'ondes. Dans le domaine du contrôle non destructif et de l'isolation sismique, le cas des fissures de surface ou de géométries proches a ainsi été traité avec différentes méthodes selon les moyens et les objectifs recherchés.

Dans le cadre de l'isolation sismique (Cf. Chap.1, § 1.3.3), de nombreux modèles ont été développés pour calculer l'efficacité des tranchées d'isolation. Les méthodes d'éléments finis et de différences finies présentent l'avantage de pouvoir traiter des modèles très proches de la réalité car on peut affecter des paramètres élastiques différents en chaque point¹. On remarquera par exemple le travail de Fuyuki et Matsumoto² en différences finies ou celui de Segol et al³ en éléments finis sur ce sujet. L'objectif, dans ces études, est de mesurer les amplitudes maximales du mouvement du sol autour de la tranchée qui présente des caractéristiques géométriques très proches de celles d'une fissure de surface. La modélisation en deux dimensions a permis notamment de quantifier l'efficacité de ces tranchées d'isolation.

¹ Dhatt G., Touzot G., 1984. *Une présentation de la méthode des éléments finis*, 2nd éd., Maloine S.A. Ed., Paris.

² Fuyuki M., Matsumoto Y., 1980. *Finite difference analysis of Rayleigh wave scattering at a trench*, Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 70, n°6, pp 2051-2069.

³ Segol G., Lee P.C.Y., Abel J.F., 1978. *Amplitude reduction of surface waves by trenches*, Journal of the engineering mechanics division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, vol. 104, n°EM3, pp 621-641.

Ces modèles ont ensuite été repris et améliorés en ce qui concerne les modèles de sols et certains paramètres géométriques¹.

Dans le cadre de la détection et de la caractérisation de défaut de surface, les méthodes d'éléments finis ont également été développées. Ganji et al² ont mis au point un modèle de propagation des ondes de Rayleigh. Ce modèle calcule le mouvement du sol provoqué par le passage de ce type d'onde sur des obstacles de surface et de subsurface. A terme, ils étudient l'influence de la présence de ces obstacles sur les courbes de vitesses de phase calculées comme en SASW (Cf. Chap. 1, § 1.3.2). Dans le cas d'obstacles peu profonds, des fluctuations apparaissent sur la courbe de vitesse de phase. Selon Ganji ces fluctuations peuvent être quantifiées et permettent une localisation précise du défaut, l'estimation de la taille de l'obstacle et de sa profondeur restant plus délicate. La modélisation numérique apparaît ici comme un outil précieux et très souple pour l'analyse des phénomènes de propagation d'onde sur ce type de géométries.

Les méthodes d'éléments finis ont ainsi donné de très bons résultats. Il faut cependant noter que la discrétisation des volumes exige un nombre de points important ce qui peut poser un problème de temps de calcul et de mémoire. De plus, ces méthodes sont mal adaptées aux traitements d'interfaces avec des changements abrupts de paramètres élastiques. Il existe différents bruits numériques directement liés aux approximations utilisées.

Les méthodes d'éléments de frontières apparaissent mieux adaptés pour ce type de problèmes. Elles permettent de limiter les nombres de points de discrétisation en améliorant la précision au niveau des frontières. Klein et al³ proposent ainsi un modèle numérique 3D par éléments de frontière dans le domaine des tranchées d'isolation. Ce modèle affine les résultats déjà établis à propos de ces tranchées en prenant en compte plus de paramètres. Ces résultats sont néanmoins très difficiles à comparer avec des modèles de diffraction d'une onde sur une géométrie similaire. En effet, seule l'amplitude maximale du mouvement est traitée dans cette étude, l'interprétation des différents phénomènes de diffraction n'y est pas explicitée.

¹Le Houedec D., Picard J., 1989. *Analyse de la réduction de la propagation des vibrations dans le sol au moyen de tranchées ou d'écrans*. Colloque Nat. AFPS, St-Remy-lès-Chevreuse (France), Avril 89.

²Ganji V., Gucunski N., Malher A., 1997. Detection of underground obstacle by SASW method - numerical aspects. *Jr. Geotechnical and geoenvironmental engineering*, Vol. 123, No. 3, pp212-219.

³Klein R., Antes H., Le Houedec D., 1997. *Efficient 3D modelling of vibration isolation by open trenches*, *Computer & Structures*, Vol. 64, n°1-4, pp 809-817.

Plus récemment, des méthodes hybrides qui consistent en une combinaison des méthodes d'éléments finis et d'éléments de frontière ont été proposées. Elles permettent des modélisations très performantes utilisant les atouts des deux méthodes. Dans le cadre de la détection de fissure de surface, Liu et al¹ ont ainsi proposé une méthode hybride éléments finis - éléments de frontière pour modéliser la diffraction d'une onde SH par une fissure de surface. L'analyse des résultats permet une réelle compréhension des différents phénomènes de diffraction de l'onde SH et permet d'envisager le développement de méthodes de détection et de caractérisation des fissures de surface.

Quelle que soit la méthode utilisée, la modélisation est un outil de plus en plus développé pour l'étude de la propagation des ondes sur des défauts de surface. Suivant la précision des méthodes, les informations théoriques fournies sont un apport important pour la compréhension des phénomènes de diffraction. La souplesse d'utilisation de ce genre de modèle permet également d'envisager l'étude théorique de géométries particulières. La modélisation numérique, dans la mesure où la méthode de calcul est bien adaptée au problème, semble être un outil efficace pour la recherche et le développement de techniques de détection et de caractérisation des défauts de surface.

2.2 IBEM : ELEMENTS THEORIQUES ET DESCRIPTION.

2.2.1 Introduction.

En nous appuyant sur l'expérience de Helle Pedersen et de Michel Campillo², nous avons choisi pour la modélisation de notre problème, d'utiliser la méthode indirecte d'éléments de frontière (IBEM, pour Indirect Boundary Element Method). Comme dans toutes les méthodes d'éléments de frontière, seules les interfaces sont discrétisées. Le modèle peut être homogène par morceau. Les variations des paramètres élastiques sont discontinues d'un morceau à l'autre. Cela représente des nombres de points de discrétisation beaucoup moins importants que pour les méthodes d'éléments finis avec une meilleure résolution au niveau des interfaces. En cela, les méthodes de frontière sont bien adaptées à l'étude de la propagation des

¹Liu S.-W., Sung, J.-C., Chang C.-S., 1997. *Transient scattering of SH waves by surface breaking and sub-surface cracks*, *Int. J. Solids Structures*, vol. 34, No. 30, pp 4019-4035

²Pedersen H.A., Sanchez-Sesma F.J., Campillo M., 1994. *Three-dimensional scattering by two-dimensional topographies*, *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol 84, pp 1169-1183.

ondes élastiques dans un milieu fissuré puisque la qualité du traitement au niveau de la surface irrégulière est un critère important.

L'approche directe des méthodes d'éléments de frontière pour les problèmes d'élasticité dynamique, consiste à formuler les inconnues en terme de déplacements et de tractions. Dans l'approche indirecte, le problème est formulé en terme de densité de force sur les surfaces ce qui peut donner un sens plus physique à la nature des ondes diffractées.

2.2.2 Formules de base.

Les méthodes de frontière se basent sur le théorème de représentation¹. Selon ce théorème, le champ d'onde à l'intérieur d'un volume V occupé par un matériau élastique et délimité par une surface S , peut être décrit par la superposition des radiations de sources situées sur S (Cf. Figure 2.1). En ce sens, ce théorème peut être vu comme une application du principe de Huygens.

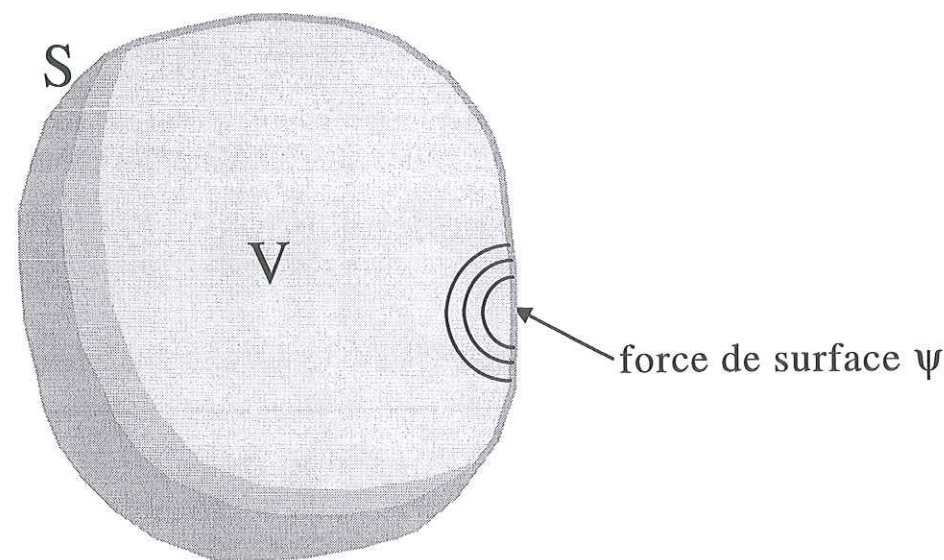


Figure 2.1 : Modèle de milieu étudié par IBEM. Le volume V est occupé par un matériau élastique et délimité par une surface S . Les demi-cercles représentent le rayonnement d'une source localisée sur S .

¹ Aki K., Richards P.G., 1980. *Quantitative seismology*, W.H. Freeman, San Francisco.

En l'absence de forces de volume, on peut écrire l'expression du champ de déplacement¹.

$$u_i(x) = \int_S \psi_j(\zeta) G_{ij}(x, \zeta) dS_\zeta \quad (\text{Eq. 2.1})$$

où

$u_i(x)$ est la i -ème composante du déplacement au point x ,

$G_{ij}(x, \zeta)$ est la fonction de Green, c'est à dire le déplacement dans la direction i en x dû à une force dans la direction j appliquée au point ζ ,

$\psi_j(\zeta)$ est la densité de force dans la direction j appliquée en ζ .

$\psi_j(\zeta) dS_\zeta$ est donc une distribution de force sur S . L'intégration est effectuée sur la variable spatiale ζ . Dans cette formule et par la suite, nous utiliserons la convention de sommation sur les indices communs.

Par une application directe de la loi de Hook, cette représentation intégrale permet la formulation du champ des tractions. Une attention particulière doit cependant être accordée pour les particularités de la frontière². En s'appuyant sur des considérations d'équilibre, on peut écrire:

$$t_i(x) = c\psi_i(x) + \int_S \psi_j(\zeta) T_{ij}(x, \zeta) dS_\zeta \quad (\text{Eq. 2.2})$$

où

$t_i(x)$ est la i -ème composante de la traction au point x ,

$T_{ij}(x, \zeta)$ est la fonction de Green de traction, c'est à dire la traction dans la direction i en x due à une source dans la direction j appliquée au point ζ ,

c égale 0 si x est en dehors de S , c égale 1/2 si x tend vers S à l'intérieur du volume V , et c égale -1/2 si x tend vers S à l'extérieur du volume.

Dans le cas d'une géométrie particulière du milieu, les mouvements résultent des interférences entre les ondes incidentes, réfléchies et diffractées. Il est commun de représenter ce déplacement total par la superposition d'un champ "diffracté" $u_i^{(d)}$ et du champ libre $u_i^{(0)}$, c'est à dire du champ de déplacement en l'absence d'irrégularité.

¹ Sanchez-Sesma F.J., Campillo M., 1993. *Topographic effects for incident P, SV and Rayleigh waves*, Tectonophysics, 218, pp 113-125.

² Pedersen H.A., Sanchez-Sesma F.J., Campillo M., 1994. *Three-dimensional scattering by two-dimensional topographies*, Bull. Seism. Soc. Am. Vol 84, pp 1169-1183.

$$u_i = u_i^{(0)} + u_i^{(d)} \quad (\text{Eq. 2.3})$$

$u_i^{(0)}$ peut être décrit analytiquement comme la propagation d'une onde plane d'une limite à l'autre du modèle ; $u_i^{(d)}$ est décrit par l'équation 2.1. De même pour les tractions :

$$t_i = t_i^{(0)} + t_i^{(d)} \quad (\text{Eq. 2.4})$$

où $t_i^{(0)}$ est le champ libre des tractions et $t_i^{(d)}$ le champ diffracté, décrit par l'équation 2.2.

Plusieurs conditions aux limites sont à satisfaire :

- a) les tractions sont nulles à la surface libre,
- b) les déplacements et les tractions sont continus à travers d'éventuelles interfaces,
- c) le champ est nul à l'infini.

En appliquant notamment la condition a) à l'équation 2.4, on obtient, à la surface :

$$t_i^{(0)} + t_i^{(d)} = 0 \quad (\text{Eq. 2.5})$$

soit, selon l'équation 2.2 :

$$c\psi_i(x) + \int_S \psi_j(\zeta) T_{ij}(x, \zeta) dS_\zeta = -t_i^{(0)} \quad (\text{Eq. 2.6})$$

2.2.3 Discrétisation et intégration.

Pour résoudre ce problème numériquement, on discrétise la surface S en N éléments. Sur chaque élément de longueur ΔS , on suppose que la densité de force $\psi_j(\zeta)$ est constante. Trois conditions sont à respecter pour la discrétisation :

- a) la longueur de chaque segment ΔS doit être petite par rapport à la longueur d'onde,
- b) le nombre N de segments doit être suffisant pour décrire correctement la surface,
- c) la surface doit être tronquée suffisamment loin de l'irrégularité que l'on étudie afin d'éviter les effets de bords.

L'expression discrète de l'équation 2.6 est

$$\sum_{k=1}^N \psi_j(\zeta_k) t_{ij}(x_n, \zeta_k) = -t_i^{(0)}(x_n) \quad n=1, N \quad (\text{Eq. 2.7})$$

où

$$t_{ij}(x_n, \zeta_k) = \int_{\zeta_k - \Delta s/2}^{\zeta_k + \Delta s/2} (c\delta_{ij}\delta(x_n - \zeta_k) + T_{ij}(x, \zeta_k)) dS_\zeta \quad (\text{Eq. 2.8})$$

Cette expression est calculée numériquement sur chaque segment par intégration Gaussienne sauf dans le cas $n=k$ où il existe une solution analytique. L'intégration Gaussienne consiste en une sommation sur deux, trois ou cinq points avec une pondération qui décroît avec la distance au centre du segment selon une courbe de Gauss.

En résolvant le système linéaire posé par l'équation 2.7, les valeurs de $\psi_j(\zeta)$ sont établies. Le champ de déplacement peut alors être calculé numériquement avec l'expression :

$$u_i(x_n) = u_i^0 + \sum_{k=1}^N \psi_j(\zeta_k) g_{ij}(x_n, \zeta_k) \quad (\text{Eq. 2.9})$$

où

$$g_{ij}(x_n, \zeta_k) = \int_{\zeta_k - \Delta s/2}^{\zeta_k + \Delta s/2} G_{ij}(x_n, \zeta_k) dS_\zeta \quad (\text{Eq. 2.10})$$

Comme pour les tractions, ces intégrales sont calculées par intégration Gaussienne. Si le point x est situé sur le segment, il est possible de calculer analytiquement l'influence du segment. En effet les fonctions de Green sont singulières au point d'application de la source mais elles sont intégrables.

On peut donc résumer le principe de la méthode IBEM de façon simple. A partir du théorème de représentation, on établit les expressions des déplacements et des tractions en termes de force de surface. On calcule la densité de force ψ qui satisfait les conditions aux limites sur les tractions par la résolution d'un système linéaire de N équations et N inconnues. Enfin on calcule le champ de déplacement en chaque point avec la densité de force obtenue précédemment. Le calcul se fait fréquence par fréquence (la fréquence intervient dans l'expression des fonctions de Green). Le

champ de déplacement résulte de la somme des déplacements liés aux différentes fréquences.

2.3 SIMULATION DE LA PROPAGATION D'UNE ONDE DE RAYLEIGH SUR UNE FISSURE DE SURFACE : APPLICATION DE LA METHODE.

2.3.1 Description du modèle.

Nous avons essayé, pour cette modélisation, de nous placer dans des conditions aussi proches que possible de nos conditions expérimentales. Le modèle est présenté Figure 2.2

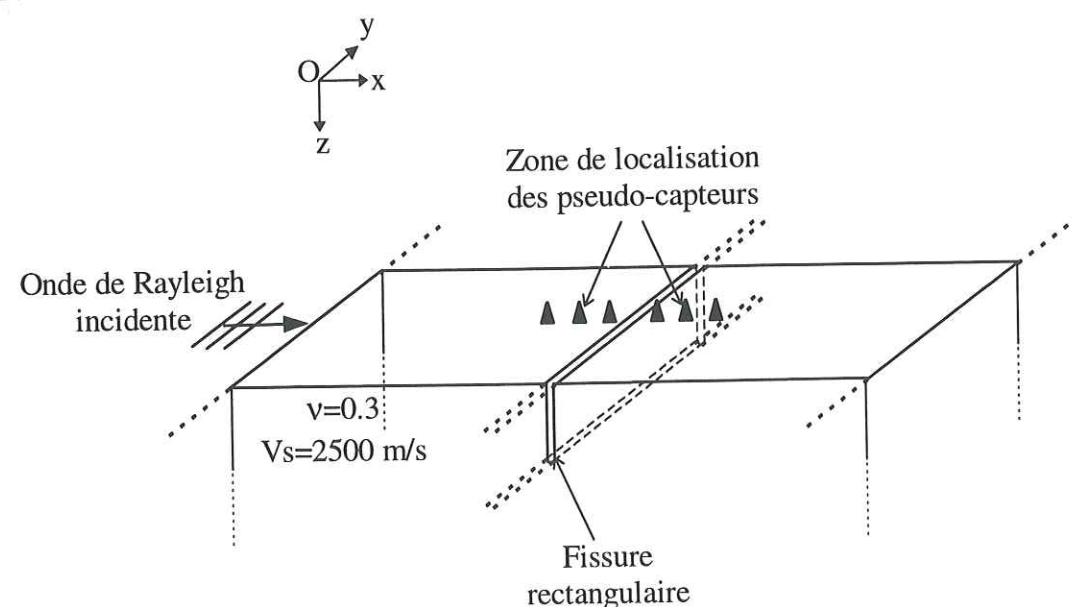


Figure 2.2 : Schéma du modèle numérique de la fissure de surface. Le modèle est infini dans la direction de l'axe Oy.

Le milieu est un demi espace infini vers le bas, élastique, homogène et isotrope. Deux paramètres le caractérisent : le coefficient de Poisson ν et la vitesse V_S des ondes S. Pour un milieu homogène, la densité ρ n'intervient pas directement. La valeur de ces paramètres pour la modélisation a été établie à partir de mesures expérimentales de la vitesse des ondes P et de Rayleigh sur une dalle de béton :

$$V_P \approx 4500 \text{ m/s}$$

$$V_R \approx 2300 \text{ m/s}$$

Selon les équations présentées au chapitre 1 (Eq 1.3 à 1.6), on peut établir :

$$V_S \approx 2500 \text{ m/s}$$

$$\nu \approx 0,3$$

Les valeurs de vitesses sont des approximations liées à nos propres conditions expérimentales. La vitesse des ondes dans le béton varie largement avec les caractéristiques du matériau. Elle dépend des éléments constitutifs, de leur dosage ainsi que du niveau d'altération de l'objet considéré. C'est pourquoi on pourra trouver dans la littérature¹ des valeurs légèrement différentes. Pour le modèle numérique, en fixant $V_S = 2500 \text{ m/s}$ et $\nu = 0,3$, on obtiendra $V_R = 2318 \text{ m/s}$ et $V_P = 4670 \text{ m/s}$.

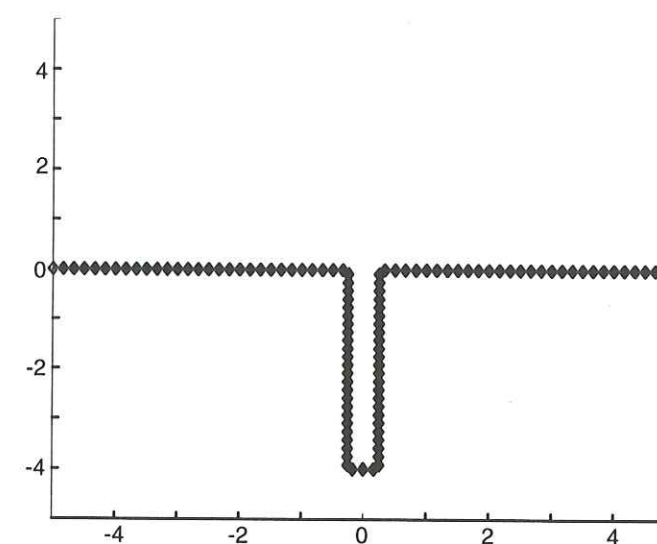


Figure 2.3 : Exemple de discrétisation d'un modèle de fissure de 4 cm de profondeur. Les points représentés sont les centres de chacun des segments. Les parties planes de la modélisation s'étendent à gauche et à droite de -40 à +40 cm.

Les caractéristiques géométriques de la fissure sont établies en référence à des fissures expérimentales réalisées avec une scie à béton sur un site test. Ces fissures sont simples, rectangulaires, perpendiculaires à la surface. Les profondeurs sont variables et l'épaisseur est de 5mm en relation avec l'épaisseur de la lame de scie que nous avons utilisée. Le modèle considère que la fissure est de longueur infinie dans la direction Oy. La discrétisation de la fissure se fait selon les conditions citées au paragraphe 2.2.3 (Cf Figure 2.3). La première concerne la longueur de chaque segment par rapport à la longueur d'onde. Afin de la satisfaire sans surcharger le

¹ Bay J.A., Stokoe II K.H., 1992. *Field and laboratory determination of elastic properties of portland cement concrete using seismic techniques*, Transportation research record 1355, pp 67-74.

calcul, nous avons choisi un nombre de 5 points par longueur d'onde (chaque point est le milieu d'un segment). La deuxième condition implique que le nombre de segments soit suffisant pour décrire correctement la surface. Nous avons ainsi établi un nombre de 2 segments minimum pour décrire l'épaisseur de la fissure avec pour conséquence d'augmenter le nombre de points par longueur d'onde si nécessaire. Enfin la largeur du modèle est établie en fonction de la profondeur de la fissure. Elle est au minimum deux fois plus grande.

Pour visualiser la propagation et la diffraction des ondes dans notre modèle, nous utilisons des points d'observation qui sont l'équivalent des capteurs de mouvement dont nous disposons expérimentalement. A chacun de ces pseudo-capteurs (ou "stations" en termes de sismologie), le programme calcule le déplacement selon les trois composantes sous forme de spectre en fréquence. Les signaux temporels sont reconstruits par transformation inverse de Fourier. La position de ces capteurs se fait selon une ligne perpendiculaire à la fissure (Cf. Figure 2.2). Leur nombre peut être important sans nuire à la rapidité du calcul. Nous établirons ainsi une ligne de 101 capteurs installés symétriquement de part et d'autre de la fissure.

La diffraction des ondes est modélisée en trois dimensions, l'orientation de l'onde incidente est donc libre. Pour simplifier le calcul et en relation avec les procédures expérimentales, nous avons choisi un angle perpendiculaire à la fissure. Le problème est ainsi ramené à deux dimensions, la géométrie et la propagation étant décrites dans le même plan.

2.3.2 Problèmes liés à la troncature du modèle.

Le modèle présenté ici est tronqué à une certaine distance de la fissure. Cette troncature peut poser des problèmes puisque les extrémités deviennent des points diffractants. Dans le cas des ondes de surface, ces extrémités agissent comme des réflecteurs créant des ondes qui perturbent les signaux.

Pour limiter ces effets de bords, nous avons utilisé deux solutions¹. La première consiste à élargir le modèle de façon à ce que les ondes réfléchies sur les bords arrivent tardivement dans la zone d'observation et soient plus atténuées.

¹Pedersen H.A., 1994. *Etude de la diffraction tridimensionnelle des ondes sismiques dans des structures à géométrie bidimensionnelle. Développement théorique et applications*. Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier - Grenoble I.

L'inconvénient de cette solution est que la taille de la surface à discrétiser augmente ce qui alourdit considérablement le calcul. Pour un modèle d'environ 800 points, le temps de calcul de soixante quatre fréquences sur IBM RISC 6000 est de l'ordre de 6 à 8 heures.

La seconde solution consiste à introduire des bords absorbants. La méthode de bords absorbants est basée sur la notion d'atténuation anélastique. Cette notion peut être décrite par le facteur de qualité Q . Dans l'hypothèse où le facteur de qualité ne dépend ni de la fréquence, ni de la vitesse des ondes, on peut définir Q de façon générale par la relation¹ :

$$\frac{1}{Q} = -\frac{\Delta E}{2\pi E} \quad (\text{Eq. 2.11})$$

où E est le maximum d'énergie et $-\Delta E$ est la perte d'énergie due à l'anélasticité pour un cycle.

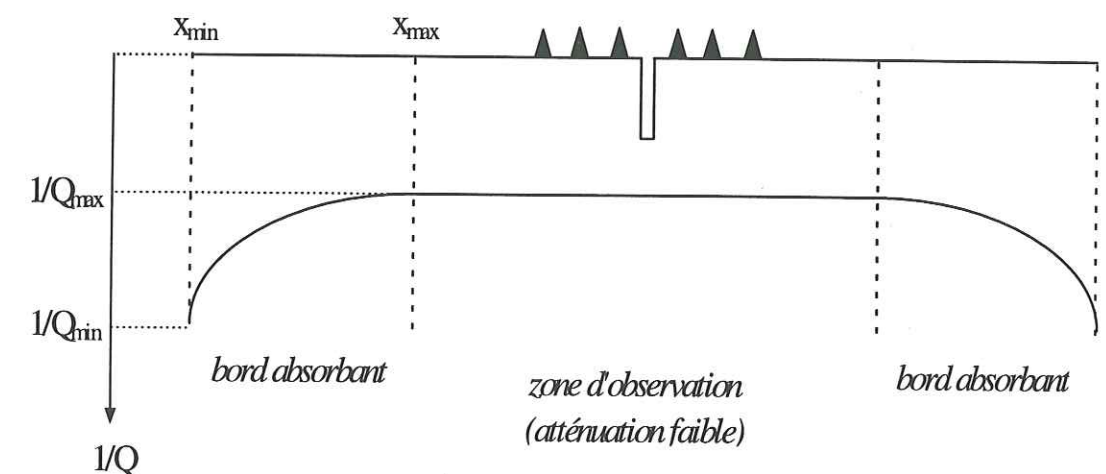


Figure 2.4 : Profil du modèle et localisation des bords absorbants

Q est très grand pour une atténuation faible, et, inversement, petit pour une atténuation forte. Les bords absorbants sont des zones où Q est artificiellement faible. Afin d'éviter de créer un nouveau diffracteur en introduisant de façon brutale une atténuation forte sur les bords du modèle, on diminue graduellement le facteur de qualité (Cf. Figure 2.4). L'introduction des bords absorbants est d'autant plus efficace que la longueur d'onde est petite. En effet la taille des zones absorbantes étant limitée, plus le nombre de cycles sur la zone est grand, plus l'onde sera atténuée.

¹Aki K., Richards P.G., 1980. *Quantitative seismology*, W.H. Freeman, San Francisco.

Nous avons choisi dans un premier temps de négliger l'atténuation intrinsèque dans notre modèle pour éviter de masquer d'éventuels phénomènes liés à la diffraction. Dans la zone d'observation, $Q_{\max} = 1000$. Pour limiter au maximum les réflexions sur les limites du modèle, le facteur de qualité a été fixé à $Q_{\min} = 0,001$. Ces deux valeurs sont reliées par une relation du type :

$$Q(x) = Q_{\max} \left(\frac{Q_{\min}}{Q_{\max}} \right)^{\frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}} \quad (\text{Eq. 2.12})$$

dans le cas du premier bord absorbant où $Q = Q_{\min}$ quand $x = x_{\min}$ et $Q = Q_{\max}$ quand $x = x_{\max}$. x_{\min} est placé à l'extrémité du modèle, x_{\max} est situé à égale distance de la fissure et de l'extrémité du modèle (Cf. Figure 2.4). Cette relation permet une augmentation graduelle de l'atténuation vers l'extérieur du modèle sans générer de diffraction.

2.3.3 Premiers résultats.

2.3.3.a Mise en forme des sismogrammes.

Pour présenter les résultats sous la forme de sismogrammes synthétiques, on utilise un algorithme de transformation de Fourier inverse. En effet, le programme calcule le déplacement en chaque station sous forme de spectre en fréquences. Pour calculer cette transformation dans de bonnes conditions et afin d'améliorer la qualité des sismogrammes synthétiques, plusieurs critères sont à respecter.

Le premier critère concerne le pas d'échantillonnage en temps et le nombre de points. Le pas d'échantillonnage en temps dt est relié à la durée du signal en temps D et au nombre de points N par la relation :

$$dt = \frac{D}{N} \quad (\text{Eq. 2.13})$$

Les relations de ces paramètres temporels avec le pas d'échantillonnage en fréquence df et la durée du signal en fréquence F_{\max} sont :

$$df = \frac{1}{D} = \frac{1}{N \cdot dt} \quad \text{et} \quad F_{\max} = df \cdot \frac{N}{2} \quad (\text{Eq. 2.14 et 2.15})$$

d'où

$$F_{\max} = \frac{1}{2dt} \quad (\text{Eq. 2.16})$$

df conditionne donc la durée du signal temporel et F_{\max} , le pas d'échantillonnage en temps. La durée du signal temporel doit être suffisamment grande pour que les diffractions et les réflexions aient le temps de se développer de manière lisible. df et F_{\max} sont limités pour des raisons de temps de calcul et de capacité de l'ordinateur. Afin d'améliorer la qualité des sismogrammes sans surcharger le calcul, on pourra rééchantillonner les signaux synthétiques en prolongeant les spectres en fréquence par des valeurs nulles. On augmente ainsi artificiellement N et F_{\max} sans modifier les informations contenues dans le signal. Cela permet d'obtenir un pas d'échantillonnage en temps plus fin pour la même information fréquentielle. Il est également intéressant que le nombre de points soit une puissance de deux pour pouvoir utiliser l'algorithme de transformation rapide de Fourier.

Les spectres en fréquence calculés par le programme contiennent de l'énergie dans toute la gamme de fréquence étudiée. Afin d'améliorer la qualité des sismogrammes synthétiques, nous multiplions les spectres calculés par celui d'un signal source. Le signal choisi est une impulsion de Ricker. Son spectre $R(f)$ est défini par la relation :

$$R(f) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{f^2}{F_{CR}^3} \cdot \exp\left(-\frac{f^2}{F_{CR}^2}\right) \quad (\text{Eq. 2.17})$$

où F_{CR} est la fréquence centrale de l'impulsion (Cf. Figure 2.5).

Cette multiplication présente différents intérêts. Tout d'abord, elle permet, en adaptant le choix de la fréquence centrale du Ricker, de centrer les signaux sur les fréquences qui nous intéressent plus particulièrement.

Etant donné la forme du spectre du Ricker (Cf. Figure 2.5), la multiplication assure également la continuité des spectres en annulant les fréquences maximales. On limite ainsi les oscillations dues au phénomène de Gibbs sur les traces temporelles. Afin de limiter au maximum ces oscillations, on calculera la fréquence maximale F_{\max} et on choisira la fréquence centrale du Ricker F_{CR} telles que :

$$F_{CR} \leq \frac{F_{\max}}{3} \quad (\text{Eq. 2.18})$$

La durée temporelle de l'impulsion de Ricker est d'autant plus brève que la fréquence centrale est élevée. Un signal source trop large peut masquer les

phénomènes que l'on cherche à mettre en évidence. Le choix de la fréquence centrale du Ricker est donc un compromis entre la limitation des oscillations dues au phénomène de Gibbs et la durée du signal source.

Enfin, la multiplication des spectre par le spectre d'un Ricker assure l'atténuation des fréquences les plus basses. Cela permet dans le cadre de notre modélisation de limiter les effets de bords pour ces fréquences. En effet, la technique des bords absorbants n'est efficace que pour les petites longueurs d'onde.

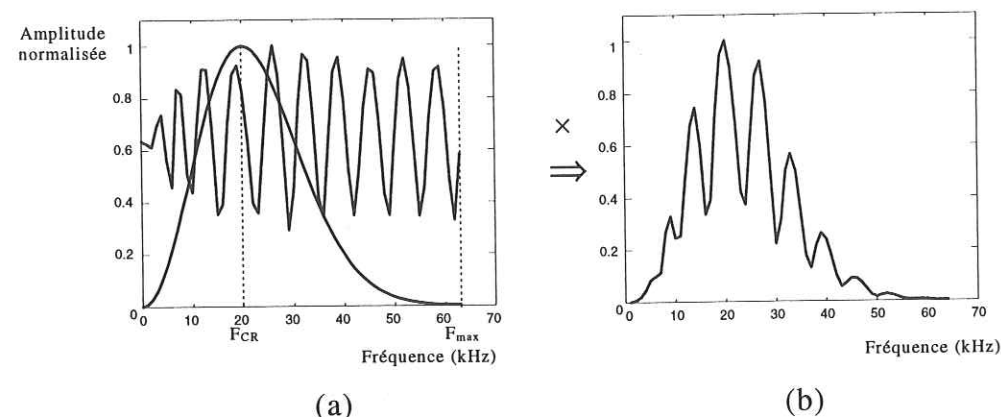


Figure 2.5 : Exemple d'amplitude spectrale d'un signal numérique et d'un Ricker de fréquence centrale 20 kHz (a). Les deux spectres sont multipliés (b), ce qui correspond à une convolution dans le domaine des temps.

Expérimentalement, le signal source est déterminé par la masse qui frappe le béton. Sa durée temporelle correspond au temps de contact de la masse avec la structure. Du fait des multiples diffractions qui ont lieu dans le béton, il est difficile d'isoler le signal source sur les traces temporelles et de déterminer sa forme. La modélisation de l'impulsion n'a donc pas été choisie en fonction de données expérimentales mais selon des critères numériques pour améliorer la lisibilité des signaux synthétiques.

2.3.3.b Interprétation.

Les signaux synthétiques obtenus dans le cas d'une fissure de profondeur $h = 9$ cm pour une impulsion de Ricker de fréquence centrale $F_{CR} = 20$ kHz sont présentés Figure 2.6. Les observations des composantes horizontale et verticale se complètent pour améliorer l'interprétation. On peut ainsi identifier les différents

trains d'onde en établissant les étapes du phénomène de diffraction de l'onde de Rayleigh sur la fissure.

Dans un premier temps, l'onde de Rayleigh incidente (notée **a** sur le schéma d'interprétation) se propage en direction de la fissure avec une vitesse V_R ($V_R = 2318$ m/s). Arrivée au contact de la fissure, une partie de l'énergie est directement transmise (**b**) et une partie est réfléchie vers la source (**c**) sous forme d'onde de Rayleigh. On notera qu'au contact de la fissure, une partie de l'énergie est convertie en onde de volume. Cette énergie est soit transmise (**f**) soit réfléchie (**g**). Elle se propage à une vitesse supérieure à celle des ondes de Rayleigh ($V_P = 4670$ m/s).

On observe également la présence d'une onde de Rayleigh (**d**) qui se propage de la même façon que l'onde directement transmise mais avec un décalage en temps noté Δt . Le train d'onde **d** correspond à l'énergie qui s'est propagée sous forme d'onde de surface "autour" de la fissure c'est à dire en suivant les surfaces libres à l'intérieur de la fissure. En effet, le décalage en temps correspond à la distance supplémentaire parcourue. On vérifie que cette distance est égale à deux fois la profondeur p de la fissure.

$$\Delta t = 77 \mu s$$

$$V_R = 2318.5 \text{ m/s}$$

$$\Rightarrow dx = V_R \cdot \Delta t = 0,18 \text{ m soit } 2h.$$

Le fond de la fissure peut être assimilé à un point qui diffracte l'énergie qu'il reçoit. Il se comporte alors comme une source ponctuelle en émettant des ondes de surfaces et des ondes de volume. Les ondes de surface se développent ensuite à la surface du matériau générant l'onde **d** dans le sens de propagation et l'onde **e** dans le sens inverse. La forme en hyperbole du front d'onde **h** est caractéristique d'une onde de volume émise par une source ponctuelle située en profondeur et enregistrée à la surface par une ligne de capteurs.

Cette interprétation est confirmée par l'observation des sismogrammes synthétiques calculés pour des fissures de 4 et 16 cm de profondeur, présentés Figure 2.7. Le décalage en temps Δt apparaît proportionnel à la profondeur de la fissure. Les autres types d'ondes sont également présents avec des caractéristiques identiques à celles décrites précédemment.

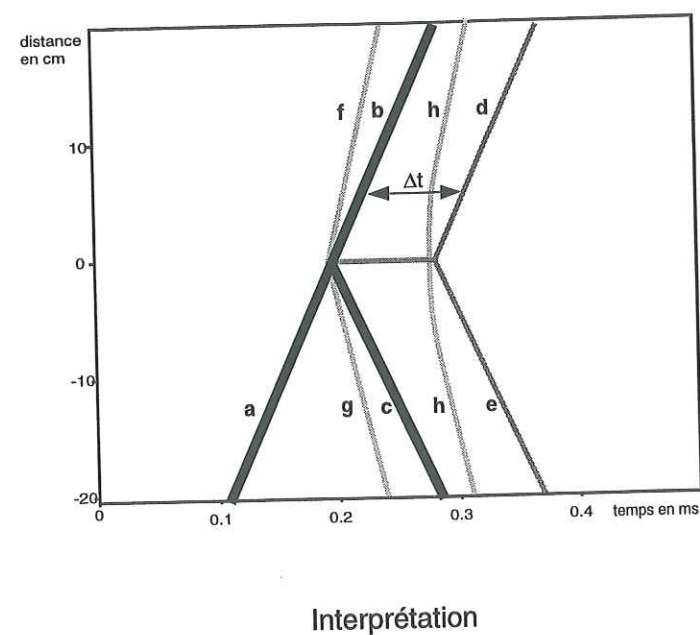
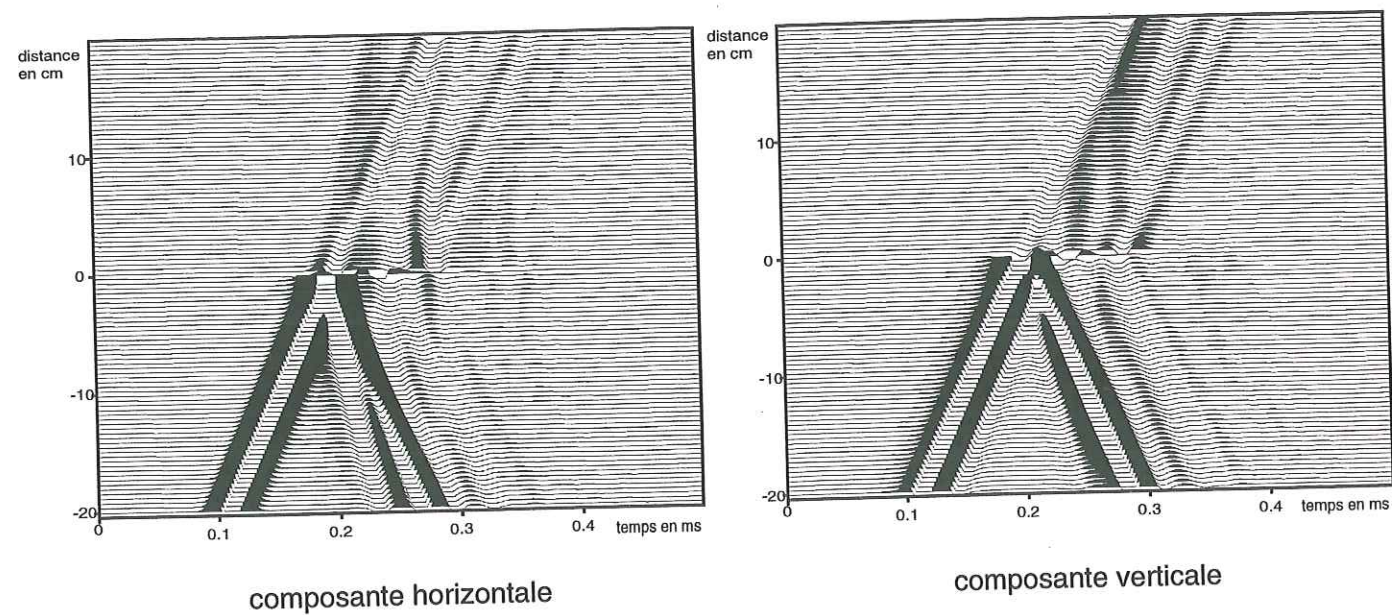
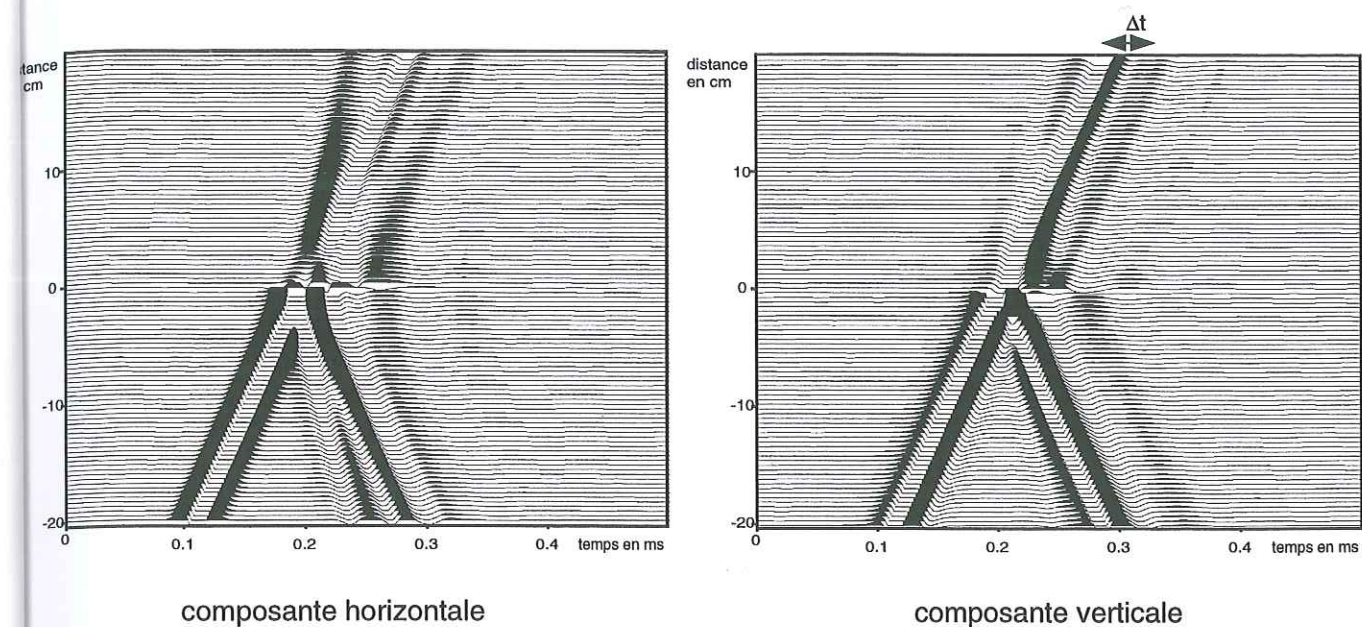
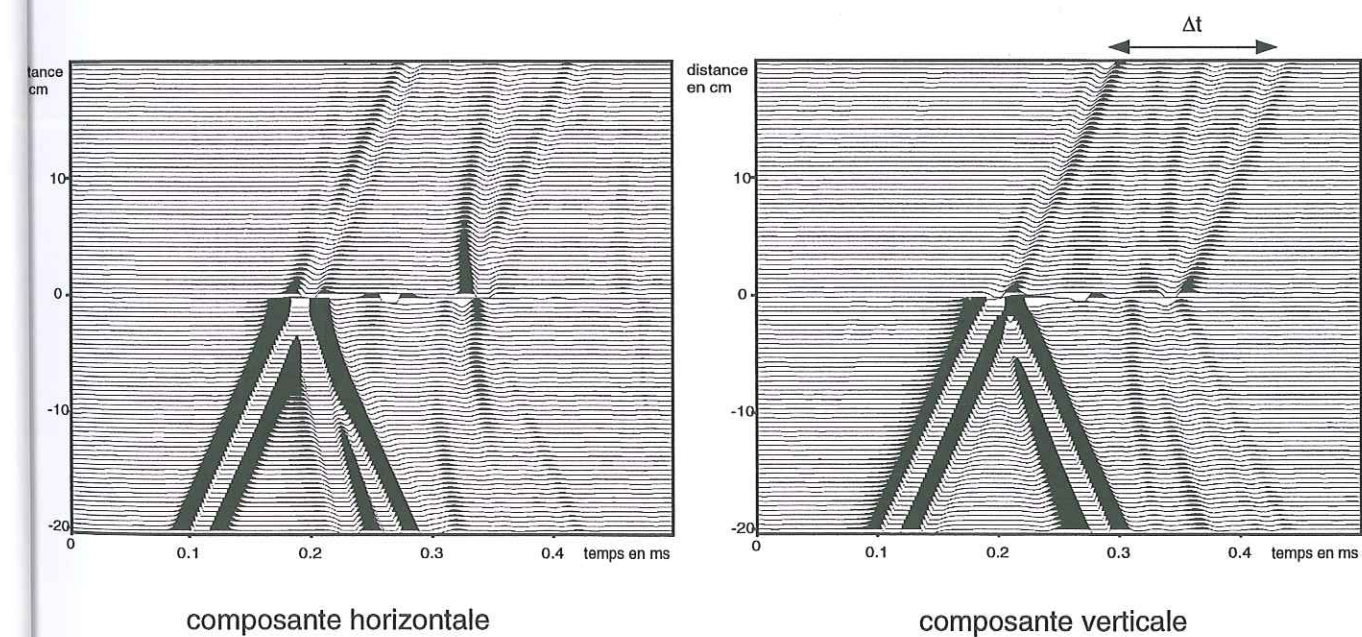


Figure 2.6 : Sismogrammes synthétiques en déplacement obtenus dans le cas d'une fissure rectangulaire de 9 cm de profondeur et de 0,5 cm d'épaisseur et schéma d'interprétation des différents trains d'onde. La fissure est au centre du modèle, les 101 pseudo-capteurs sont régulièrement disposés de -20 à +20 cm.
a : onde de Rayleigh incidente (Ricker - $F_{CR}=20\text{kHz}$) ;
b : onde de Rayleigh directement transmise ;
c : onde de Rayleigh réfléchi sur la fissure ;
d : onde de Rayleigh transmise avec un décalage en temps ;
e : onde de Rayleigh réfléchi avec un décalage en temps ;
f : onde P transmise ; g : onde P réfléchi ;
h : onde P diffracté sur l'extrémité de la fissure.



Fissure de 4 cm de profondeur



Fissure de 16 cm de profondeur

Figure 2.7 : Sismogrammes synthétiques en déplacements obtenus pour une fissure de 4 cm (en haut) et 16 cm de profondeur (en bas). Le Δt indique le décalage en temps entre les différentes ondes de Rayleigh transmises. Ce décalage est proportionnel à la profondeur de la fissure.

On voit que ces sismogrammes sont très précis et que leur simple observation fournit une grande quantité d'informations. Ils permettent une interprétation très fine des différents phénomènes qui interviennent lors du passage de l'onde de Rayleigh sur une géométrie de fissure de surface.

2.4 CONCLUSION.

La modélisation numérique par IBEM est un outil bien adapté à l'étude de notre problème. Les qualités de la méthode ont déjà été établies à des échelles supérieures et son adaptation à notre échelle ne pose pas de difficultés particulières.

La modélisation de la géométrie d'une fissure de surface en 2 dimensions est satisfaisante, particulièrement dans le cas des "fissures" expérimentales que nous avons fabriquées par des traits de scie sur une dalle de béton. Ces fissures ont des caractéristiques géométriques fixées pour toute leur longueur et aisément modélisables pour la méthode (fissures rectangulaires).

Cet outil de modélisation correspond à nos attentes puisque les objectifs que nous avons fixés sont atteints (§ 2.1.2.).

Les sismogrammes synthétiques permettent une analyse fine des différents phénomènes liés à la diffraction (transmission, réflexion, propagation autour de la fissure, conversion de mode,...). Nous disposons donc d'un modèle théorique très précis et d'une connaissance réelle des phénomènes. Ce modèle confirme celui proposé par Burger et Testa¹ (Cf. Chap. I - §1.3.4.c). Il fournit des informations supplémentaires sur les quantités d'énergie mises en jeu pour chaque phénomène et également sur l'importance des phénomènes de conversion de mode onde de surface / onde de volume. La qualité des signaux synthétiques associés à la quantité des données que l'on peut obtenir pour des temps de calcul raisonnables permet d'envisager l'étude de l'influence théorique de différents paramètres (profondeur de la fissure, épaisseur, gamme de fréquences de la source, cas de géométries plus particulières, ...) afin de parfaire notre connaissance théorique des phénomènes de diffraction d'une onde de Rayleigh sur une fissure de surface.

¹Burger C.P., Testa A., 1981. *Rayleigh wave spectroscopy to measure the depth of surface cracks*, Proceedings of the thirteenth symposium on non destructive evaluation, San Antonio TX, April 21-23.

Notre deuxième objectif était de disposer de signaux théoriques précis et utilisables de la même façon que les signaux expérimentaux. Le but est de pouvoir chercher et tester les différents traitements qui permettraient de caractériser la fissure. Les signaux synthétiques obtenus par IBEM remplissent cet objectif. Ils présentent en effet les mêmes caractéristiques que des signaux réels dans les domaines spectral et temporel.

Par rapport aux signaux expérimentaux, les signaux synthétiques sont "parfaits" (milieu homogène, infini, source située à l'infini, reproductible,...). Cela permet de développer plus facilement des procédures de traitement théorique. Différentes méthodes de détermination de la profondeur de la fissure pourront ainsi être mises au point et testées. Suivant les résultats de ces tests, les méthodes seront ensuite appliquées aux signaux expérimentaux en prenant en compte leurs particularités. Les signaux expérimentaux présentent notamment différents bruits liés aux diffractions multiples qui ont lieu dans le béton, aux réflexions sur les bords du site, à l'atténuation des ondes. La réponse fréquentielle des capteurs, la non répétabilité de la source sont aussi des éléments qui limitent la qualité des enregistrements. Des traitements classiques leur seront appliqués afin de les corriger au mieux de ces imperfections et en tirer le maximum d'information. A terme, les méthodes pourront être optimisées, la modélisation numérique restant un outil précieux pour confirmer les observations expérimentales.

La grande souplesse d'utilisation de la modélisation numérique permet enfin l'étude de cas de fissuration plus complexes. Afin de modéliser des géométries plus proches des cas réels, le cas de fissures présentant des contacts mécaniques à différents niveaux sera traité.

Univ. J. Fourier - O.S.U.G.
MAISON DES GEOSCIENCES
DOCUMENTATION
B.P. 53
F. 38041 GRENOBLE CEDEX
Tél. 04 76 63 54 27 - Fax 04 76 51 40 58
Mail : plalour@ujf-grenoble.fr

19 AOÛT 2003

Chapitre 3

Propagation d'une onde de Rayleigh
sur une fissure de surface :
mise en oeuvre expérimentale

Chapitre 3

Propagation de l'onde de Rayleigh sur une fissure de surface : mise en oeuvre expérimentale

3.1 DESCRIPTION ET JUSTIFICATION DU CHOIX DU MATERIEL.

Pour notre recherche, nous avons choisi, en parallèle de la modélisation numérique, de développer des procédures expérimentales. Nous avons ainsi été amenés à nous pencher sur les techniques d'acquisition et de traitement du signal adaptées à l'auscultation des structures.

Nous avons réalisé nos essais directement sur le matériau réel pour lequel nous souhaitons développer nos méthodes d'auscultation : le béton. Nous avons pour cela construit un site expérimental. Le béton est un matériau très hétérogène, la propagation d'une onde dans ce milieu est donc fortement perturbée. Cela se traduit par une dispersion de l'énergie dans tout le volume générant du bruit et une atténuation du signal initialement émis. L'auscultation du béton par des méthodes acoustiques est donc délicate, elle demande un travail expérimental soigné pour le choix du matériel d'acquisition, le type de source, le choix du site expérimental, les dispositifs et les traitements.

Dans un premier temps, nous souhaitons déterminer nos capacités d'acquérir des signaux dans ce milieu et d'en évaluer les qualités et les limites. Notre objectif est de trouver la procédure expérimentale la mieux adaptée à l'auscultation des fissures de surface dans le béton afin de valider expérimentalement les observations faites à partir de la modélisation numérique et développer une méthode d'évaluation de profondeur de pénétration de ces fissures.

3.1.1 Le matériel expérimental.

3.1.1.a Instrumentation pour l'acquisition.

L'acquisition des signaux nécessite différents outils allant des capteurs au support sur lequel les données sont stockées. Chaque maillon de cette chaîne joue un rôle important et doit être contrôlé pour que l'ensemble de l'acquisition soit performant.

Le capteur est un des éléments clés des mesures expérimentales. La qualité des mesures dépend largement de sa fiabilité et de sa précision. Deux caractéristiques importantes sont à prendre en compte pour choisir un capteur : la gamme de fréquence dans laquelle il répond, et sa sensibilité.

Dans le cadre de l'auscultation des structures en béton, l'objectif est la détection et la caractérisation des défauts. Ces défauts sont mis en évidence par leur interaction avec des ondes sismiques. Pour que cette interaction ait lieu de façon significative, il faut que la longueur de l'onde considérée soit du même ordre de grandeur que la taille caractéristique des défauts. La taille des défauts recherchés dans le cadre de cette étude, varie entre quelques centimètres et quelques dizaines de centimètres. Afin de couvrir au maximum toute la gamme de défauts éventuels, on cherchera à travailler avec une gamme de fréquence la plus large possible, l'idéal étant de couvrir une bande 1 à 100 kHz, soit des longueurs d'onde de l'ordre du mètre à quelques centimètres.

Cette gamme de fréquence de 1 à 100 kHz est actuellement très mal couverte par les capteurs que l'on peut trouver sur le marché. En effet, ils ne correspondent pas à des applications industrielles courantes. On trouve classiquement, pour le domaine de la mesure de vibrations, des accéléromètres adaptés à une gamme fréquentielle allant de quelques centaines de Hertz jusqu'à une dizaine de kiloHertz. Dans le domaine de l'auscultation ultrasonique, des transducteurs permettent de faire des mesures de vibrations pour des fréquences allant de la centaine de kiloHertz jusqu'à quelques mégaHertz.

Les capteurs que nous avons utilisés sont des accéléromètres piézo-électriques Brüel & Kjaer n°4393. La courbe de réponse théorique de ces accéléromètres est montrée Figure 3.1. Ces capteurs ont une gamme de fréquences utile avec une limite à 10% de 0,1 Hz à 16,5 kHz. Cela signifie que la différence entre le niveau de vibration mesuré et le niveau de vibration réel est inférieur à 10% jusqu'à 16,5 kHz, leur fréquence de résonance théorique est à 55 kHz. En acceptant une variation d'amplitude maximale de 3 dB dans la gamme de fréquence utile, on peut étendre celle-ci jusqu'à 27,5 kHz. Pour des fréquences supérieures, les variations d'amplitudes deviennent très importantes. Seules des mesures relatives sont alors envisageables en faisant l'hypothèse que deux capteurs identiques, utilisés dans les mêmes conditions de couplage et d'amplification, ont des réponses fréquentielles similaires. Cependant, si l'on veut éviter de travailler au voisinage de la fréquence de résonance, les signaux doivent être filtrés par un filtre passe-bas avec une fréquence de coupure à 25 kHz.

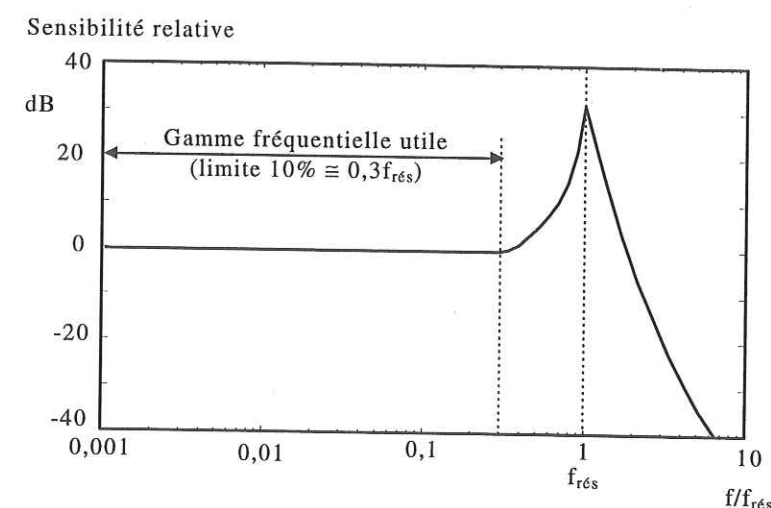


Figure 3.1 : Schéma de la sensibilité relative d'un accéléromètre Brüel et Kjaer en fonction de la fréquence (en proportion de la fréquence de résonance $f_{rés}$) d'après Serridge et Licht (BK)¹. Pour les accéléromètres n°4393, $f_{rés} = 55\text{kHz}$.

Le principe de fonctionnement de ces accéléromètres repose sur l'utilisation de céramiques piézo-électriques. Ces capteurs sont constitués d'un ensemble de masses appuyant sur des cellules piézo-électriques. La charge électrique résultante est

¹ Serridge M., Licht T.R., 1988. *Accéléromètres piézo-électriques et préamplificateurs de vibration*, Brüel et Kjaer.

la rigidité de la céramique et de la masse sismique totale, ainsi que de la géométrie de ces composants. On peut noter que, avec cette technologie, plus la masse est petite, plus la fréquence de résonance est élevée mais moins la force exercée sur la cellule est grande. Le capteur est moins sensible. Il est nécessaire d'établir un compromis entre l'étendue de la gamme de fréquence utile du capteur et sa sensibilité¹. La sensibilité théorique en charge des capteurs Brüel et Kjaer n°4393 est de $0,316 \text{ pC/m.s}^{-2} \pm 2\%$, leur poids est de 2,4 g.

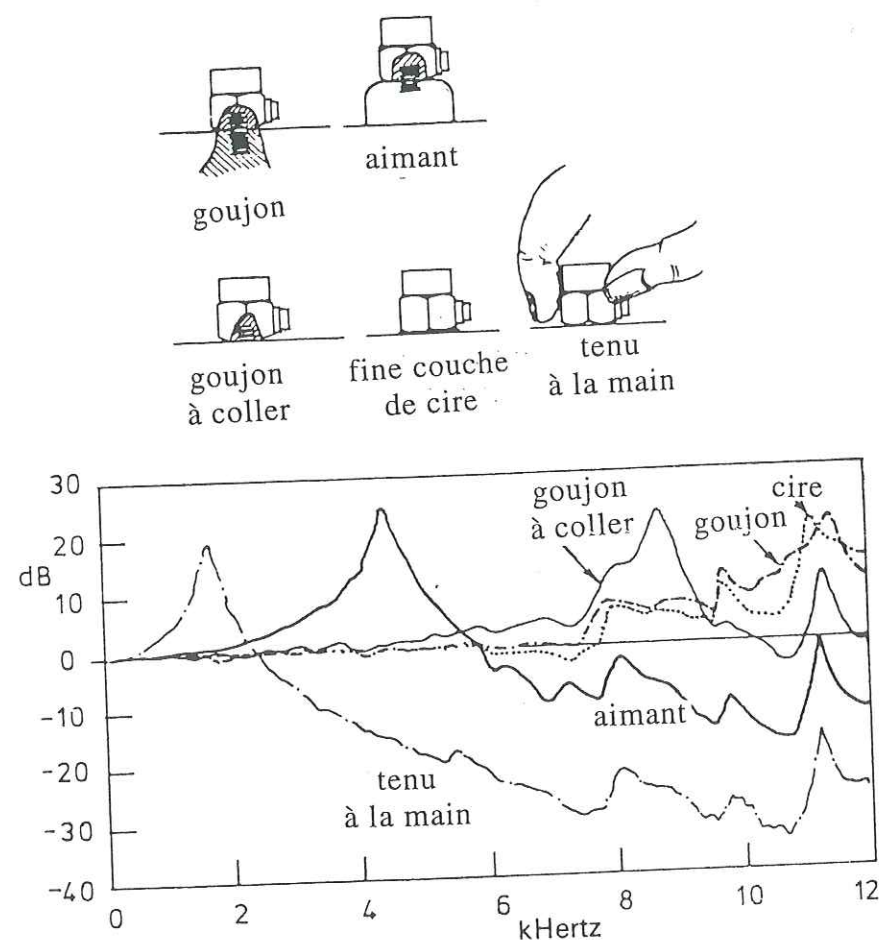


Figure 3.2 : Exemples de couplage d'un accéléromètre et leur influence sur les courbes de réponse suivant les cas (d'après Ewins²).

Le couplage des capteurs sur la structure est également un élément important pour la qualité des enregistrements parce qu'il influence la réponse fréquentielle de

¹ Serridge M., Licht T.R., 1988. *Accéléromètres piézo-électriques et préamplificateurs de vibration*, Brüel et Kjaer.

² Ewins D.J., 1984. *Modal Testing : Theory and Practice*, Research Studies Press Ltd, Somerset.

l'accéléromètre. Un mauvais couplage peut notamment diminuer la fréquence de résonance et limiter ainsi la gamme de fréquences utile (Cf. Figure 3.2). En nous appuyant sur l'expérience du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, nous avons choisi de coller les capteurs avec du phényle salicylate ($\text{C}_{13}\text{H}_{10}\text{O}_3$). Ce produit, liquide à des températures de l'ordre de 50°C , présente la particularité de cristalliser à température ambiante. Moins résistant que des colles de type cyano-acrylate mais plus souple à l'utilisation, ce collage est plus rigide que de la cire d'abeille préconisée par Ewins¹. Grâce à la fluidité du produit à chaud, la couche d'adhésif entre le béton et la base de l'accéléromètre peut être particulièrement fine. Ce facteur est important puisque dans de nombreux cas, les couches d'adhésif trop épaisses limitent les performances des capteurs à hautes fréquences².

Le signal émis par les capteurs est amplifié par des préamplificateurs de charges Campagna-Varennas adaptés à la sensibilité des accéléromètres. Ils produisent une tension de sortie proportionnelle à la charge d'entrée. La sensibilité obtenue en tension à la sortie du préamplificateur est de $10,2 \text{ mV/m.s}^{-2}$.

La dernière phase de l'acquisition est la digitalisation des signaux. Elle se fait par l'utilisation d'une chaîne pilotée par un micro-ordinateur. Cette chaîne de marque Krenz Electronics (type TRC 4010-4011) permet une acquisition synchrone sur dix voies codées sur 10 bits chacune avec une fréquence d'échantillonnage pouvant aller jusqu'à 1 Mhz. A cette fréquence, nos signaux sont largement sur-échantillonnés, on évite ainsi tout risque de repliement de spectre. Les signaux sont ensuite stockés sur le disque dur de l'ordinateur qui pilote la chaîne.

3.1.1.b La source.

Les ondes sont générées par un impact sur la surface à ausculter. Une source idéale est une source qui génère en un point précis toutes les fréquences de la bande étudiée avec un même niveau énergétique et de façon répétitive. Il s'agit

¹ Ewins D.J., 1984. *Modal Testing : Theory and Practice*, Research Studies Press Ltd, Somerset.

² Serridge M., Licht T.R., 1988. *Accéléromètres piézo-électriques et préamplificateurs de vibration*, Brüel et Kjaer.

expérimentalement de se rapprocher d'un impact infiniment bref et localisé. Il est également nécessaire que la quantité d'énergie transmise à l'intérieur de la structure soit suffisante pour la sensibilité des capteurs. Certains fabricants proposent l'utilisation de petits marteaux d'impact instrumentés. Ils permettent de générer des fréquences jusqu'à environ 10 kHz pour les plus petits. Ils présentent l'intérêt de ne pas générer de fréquences liées à leurs propres modes de résonance et restituent, par l'intermédiaire d'un capteur de force, un signal relatif à la force appliquée au moment du choc. La répétitivité de l'impact et la précision de sa localisation pour ce type de source nécessite cependant une infrastructure complémentaire (fixation du marteau à un système de rotule, contrôle de la hauteur de chute...).

Pour générer de hautes fréquences, on peut également utiliser des céramiques piézo-électriques. En effet une cellule piézo-électrique peut émettre un impact très bref si elle est soumise à une impulsion électrique adéquate. Ce type de source est classiquement utilisé pour l'auscultation ultrasonique ou pour l'acoustique subaquatique. Une adaptation de ce type de source à notre application est envisageable, elle nécessiterait cependant une étude approfondie que nous n'avons pas souhaitée développer dans le cadre de cette étude.

Nous avons choisi pour générer des ondes dans le béton, d'utiliser une source impulsionnelle constituée de billes d'acier venant frapper la surface de la structure. Dans le cas d'une surface horizontale, les billes sont lâchées d'une hauteur constante sur la surface. Afin de contrôler au mieux la position et la répétitivité de cette source, la manœuvre est exécutée à l'aide d'un électro-aimant fixe.

Le spectre de l'onde émise dans la structure dépend des caractéristiques mécaniques des matériaux (densité, taille, forme, modules élastiques...) et de la vitesse initiale de la bille. A partir de l'analyse théorique de l'impact de deux sphères, on peut établir l'expression de α , la distance d'approche des deux sphères au maximum de compression ¹:

¹ Kahan M. 1993. *Non destructive structure evaluation : an application of seismic signal analysis*. Master of science, Massachusetts Institute of Technology.

$$\alpha = \left(\frac{5 v_0^2}{4 n n_1} \right)^{2/5} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

$$\text{avec } n_1 = \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} ; \quad n = \sqrt{\frac{16 R_1 R_2}{9 \pi^2 (R_1 + R_2) (k_1 + k_2)^2}} ; \quad k_i = \frac{1 - \nu_i^2}{\pi E_i}$$

et

v_0 : vitesse initiale d'approche,
 m_i : masse de la i ème sphère,
 R_i : rayon de la i ème sphère,
 ν_i : coefficient de Poisson de la i ème sphère,
 E_i : module d'Young de la i ème sphère,
 pour $i=1,2$.

On peut extrapoler ces équations au cas de l'impact d'une sphère et d'un demi-espace infini, en faisant tendre vers l'infini le rayon et la masse de l'une des deux sphères. L'expression de α se simplifie :

$$\alpha = \left(\frac{5 \pi^2}{4} (k_1 + k_2) \rho_1 \right)^{2/5} \cdot v_0^{4/5} \cdot R_1 \quad (\text{Eq. 3.2})$$

où ρ_1 est la densité de la sphère.

Selon Kahan, le temps de contact t_{contact} de la bille sur la surface est proportionnel à α/v_0 :

$$t_{\text{contact}} \propto \frac{\alpha}{v_0} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

soit, selon l'Eq. 3.2 :

$$t_{\text{contact}} \propto \frac{R_1}{v_0^{1/5}} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

Ce temps de contact est un paramètre intéressant puisqu'il contrôle la largeur du spectre émis : plus le temps de contact est bref, plus la réponse fréquentielle est large. α étant lui-même directement proportionnel au rayon de la bille, on peut aisément

modifier le temps de contact en utilisant des billes de différentes tailles. Plus le rayon est grand plus le temps de contact sera long. Kahan établit à partir de modélisations numériques, des temps de contact, pour des billes de cuivre de 2 mm de rayon et 110 m/s de vitesse initiale, de 4,5 μ s pour des contacts sur surface rigide jusqu'à 16 μ s pour des surfaces plus souples comme de l'asphalte. Il obtient dans ce cas de l'énergie dans des bandes de fréquences allant de quelques kiloHertz jusqu'à plus de 80 kHz.

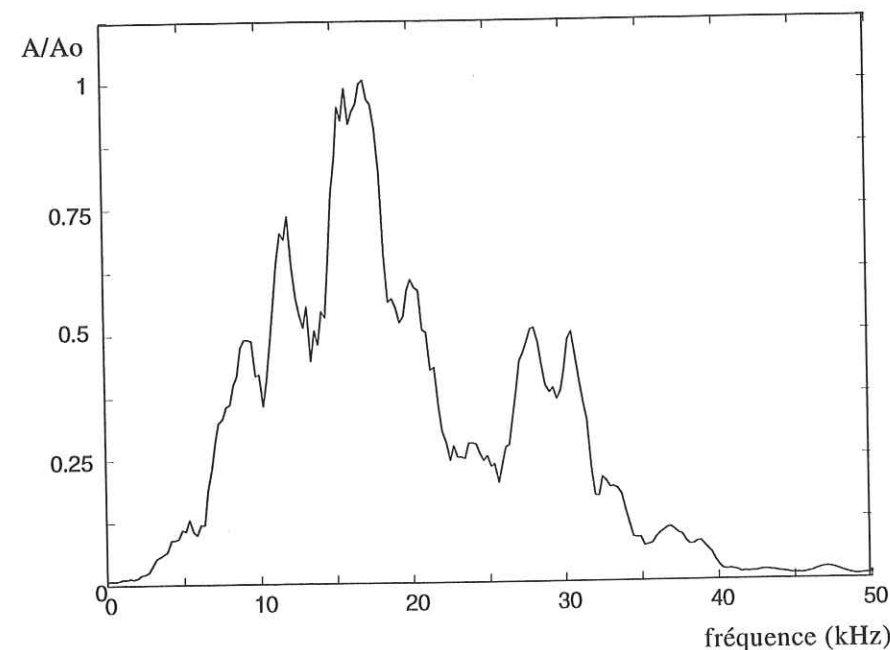


Figure 3.3 : Exemple de spectre d'amplitude enregistré par un capteur Brüel et Kjaer fixé sur une dalle de béton à 2 m de la source. L'impact est généré par une bille d'acier de 12 mm de diamètre lâchée de 40 cm de hauteur.

Nous avons utilisé des billes d'acier de différentes tailles. La Figure 3.3 présente un exemple de spectre en fréquence des ondes générées par l'impact d'une bille de 12 mm de diamètre lâchée de 40 cm de hauteur. Ce spectre est centré sur environ 16 kHz, l'énergie est émise sur une bande allant de 2 à 40 kHz. Nous avons généralement utilisé cette taille de bille pour nos essais expérimentaux sauf dans le cas de l'auscultation de fissures réelles où un contenu spectral centré sur des fréquences plus basses s'est avéré nécessaire (Cf. Chapitre 6).

3.1.2 Le site expérimental.

3.1.2.a La dalle d'essai n°1.

Pour les essais préliminaires, nous avons utilisé une dalle de béton qui existait sur le site du Laboratoire (Cf. Figure 3.4). Cette dalle n°1 a une épaisseur de 40 cm et une surface de 4m sur 4m. Elle est semi-enterrée et armée d'un treillis métallique à environ 35 cm de profondeur. Elle présente un très bon état de conservation (pas de fissure apparente, pas de zone altérée). Trois carottages y ont été effectués pour des essais acoustiques sur la partie sud.

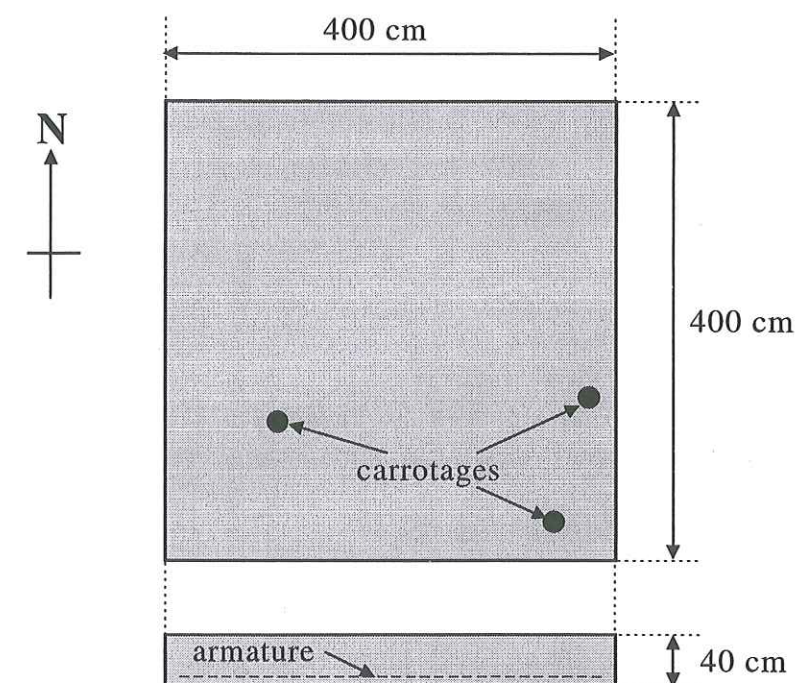


Figure 3.4 : Schéma de la dalle d'essai n°1.

Les premiers essais réalisés sur cette dalle nous ont permis de nous familiariser avec le matériau et de tester le matériel d'acquisition. La Figure 3.5 présente des signaux enregistrés sur cette dalle par deux capteurs situés à 10 et 20 cm de la source. Il s'agit de signaux sommés (5 signaux) pour améliorer le rapport signal sur bruit. On remarquera l'énergie des ondes de surface directes et les arrivées tardives qui correspondent à des réflexions sur les bords de la dalle.

Notre premier objectif était de mesurer la vitesse des ondes de Rayleigh dans ce matériau et de tester son homogénéité en fonction de la profondeur. Nous avons utilisé un dispositif adapté à l'utilisation de la méthode SASW (Spectral Analysis of Surface Waves, Cf. Chap. 1, §1.3.2.).

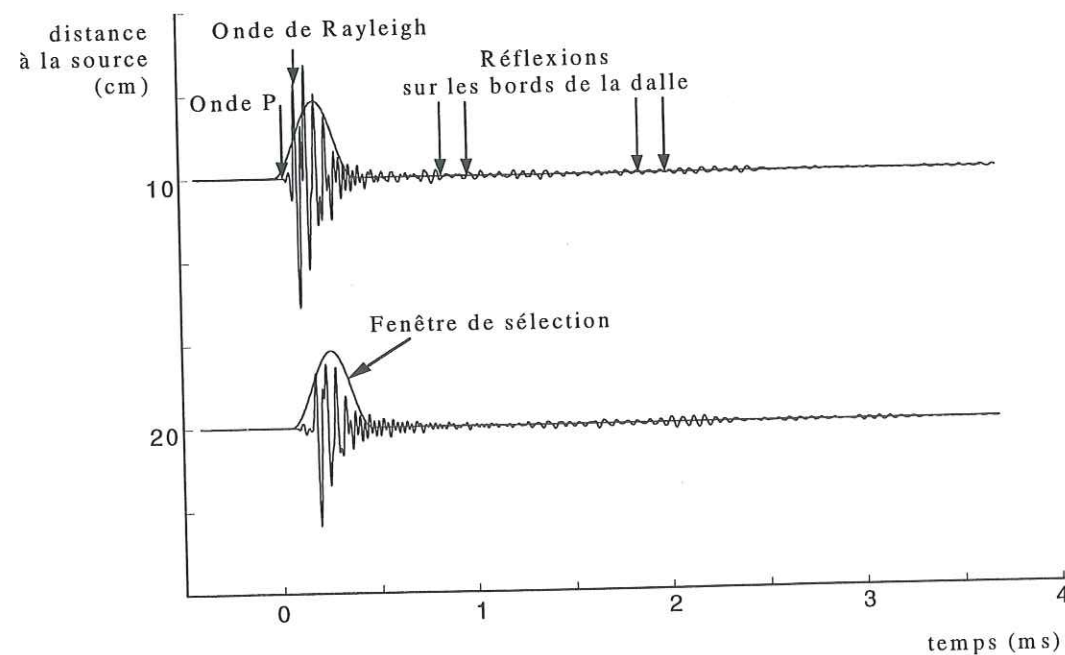


Figure 3.5 : Signaux enregistrés sur la dalle n°1 avec un dispositif pour la méthode SASW. On remarquera les arrivées tardives correspondant aux réflexions sur les différents bords de la dalle et la fenêtre de sélection placée sur les arrivées directes de l'onde de Rayleigh.

Pour atténuer le bruit lié aux réflexions tardives sur les bords de la dalle, l'onde de Rayleigh directe est isolée sur les traces temporelles par fenêtrage (Cf. Figure 3.5). Afin de prendre en compte les déphasages de plus de 2π , la phase φ est "déroulée" à partir de 0 (Cf. Figure 3.6). Un calcul de cohérence entre les deux signaux permet de vérifier s'ils contiennent suffisamment d'informations l'un par rapport à l'autre dans la gamme de fréquence étudiée. Cette méthode a été utilisée sur du béton par Bowen¹ et

¹Bowen B.R., Roesset J.M., Stokoe II K.H., 1981. *Integrity testing of concrete elements using surface waves*, Proceedings of Engineering Mechanics, Publ. by ASCE, New York, USA, pp 925-955

reprise par Kalinski¹. Un exemple de vitesse de phase obtenue selon cette méthode sur la dalle n°1 est présenté Figure 3.6.

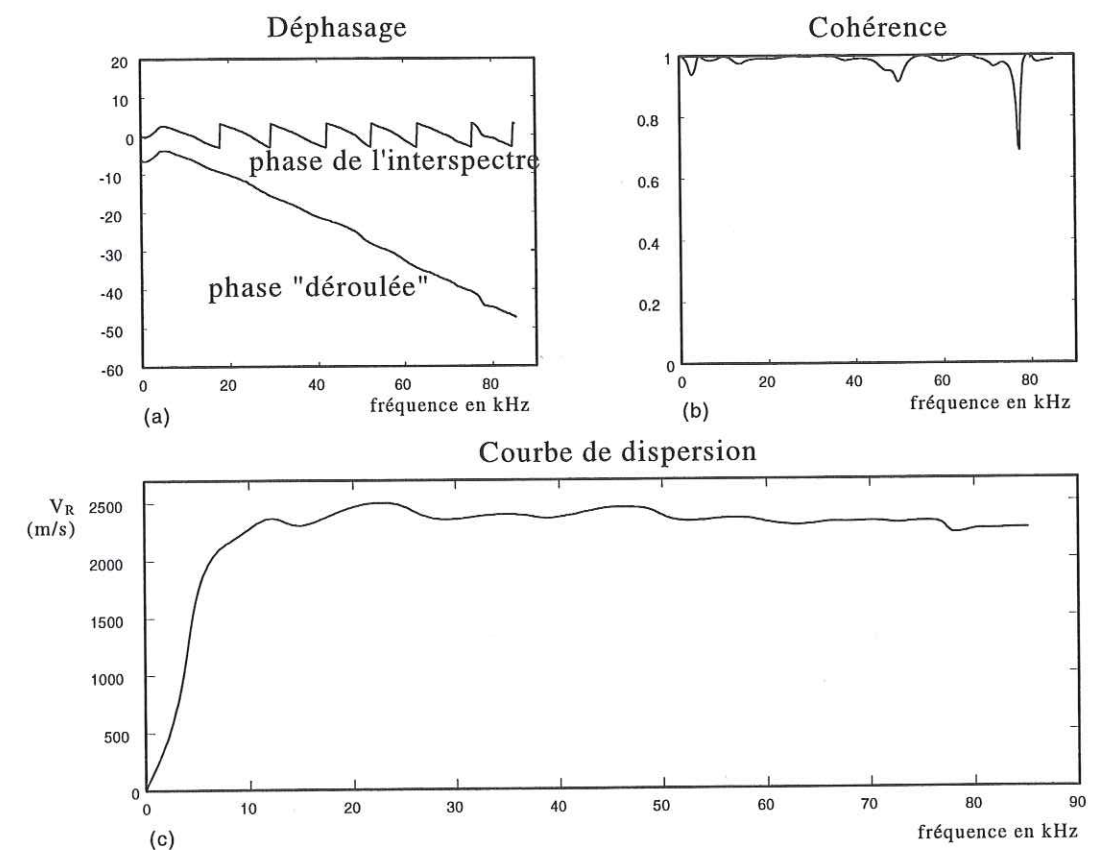


Figure 3.6 : Courbe de dispersion de la vitesse de phase calculée à partir de la phase "déroulée" de l'interspectre (a). Les zones de fluctuations sont corrélées avec les bandes de moindre cohérence (b). La vitesse de phase (c) apparaît globalement constante à environ 2335 m/s sur une bande de fréquence de 6 à 80 kHz.

La courbe de déphasage déroulé présente une décroissance régulière. Le calcul de la cohérence permet de localiser les bandes de fréquences peu cohérentes ; elles correspondent à certaines fluctuations sur la courbe de déphasage. La courbe de vitesse de phase est globalement constante sur une bande allant de 6 kHz à 80 kHz. On peut en conclure que le milieu est non dispersif et que la dalle est homogène en fonction de la profondeur. La valeur moyenne de la vitesse de l'onde de Rayleigh est

¹Kalinski M.E., Stokoe II K.H., Jirsa J.O., Roesset J.M., 1994. *Non destructive identification of internally damaged areas of concrete beam using the Spectral Analysis of Surface Waves method*. Transportation research record 1458, pp14-19.

estimée ici à 2335 m/s avec un écart type de ± 114 m/s pour la bande de fréquence [6 kHz ; 80 kHz]

Pour étudier l'influence des fissures de surface sur la propagation des ondes de Rayleigh, ce site présente quelques limites. Tout d'abord il ne permet pas d'interpréter correctement les ondes dont la longueur est supérieure aux quarante centimètres d'épaisseur de la dalle sans prendre en compte l'influence du sol sous-jacent (35 cm environ si l'on veut éviter l'influence des aciers). Ces longueurs d'ondes correspondent à des fréquences de 0 à 5-6 kHz. Cela limite la profondeur d'éventuelles fissures de surface auscultables si l'on souhaite rester dans l'hypothèse d'un demi espace infini. La taille du massif est également une limite pour développer une étude sur plusieurs fissures sans être gêné par l'influence des différents bords. Il s'agit de nous placer dans des conditions expérimentales les plus favorables pour le développement de la méthode sur ce matériau. Cela nous a conduit à construire un second site mieux adapté à nos besoins et pour lequel nous contrôlions le maximum de paramètres.

3.1.2.b La dalle d'essai n°2.

Une seconde dalle de 6 m sur 5 m et 60 cm d'épaisseur a été réalisée sur le site du laboratoire (Cf. Figure 3.7). Notre objectif était de construire un bloc le plus homogène possible, sans armature métallique.

La difficulté de construire un élément en béton de cette taille est liée au retrait du matériau lors du séchage. Le retrait est la conséquence de l'évaporation de l'eau, de l'hydratation du ciment et de la dilatation thermique. Ce retrait génère des contraintes internes importantes qui peuvent provoquer de la fissuration. Pour un bloc de grande taille, l'évaporation ne se fait pas de façon simultanée sur les surfaces et au coeur du massif, la quantité de chaleur dégagée par la réaction chimique de la prise est très importante. Les contraintes internes sont très fortes, elles augmentent considérablement les risques de fissuration. Pour essayer de limiter ce risque, nous avons utilisé un béton comportant des fibres plastiques. Les fibres plastiques mélangées à la pâte de béton ont pour fonction d'augmenter la résistance à la traction

et de diminuer la fragilité en permettant une certaine déformabilité. D'autre part, pour ralentir l'évaporation, la dalle a été coulée à une température extérieure modérée et dans un coffrage recouvert d'un film plastique, un produit de cure¹ a également été pulvérisé en surface sur le béton frais.

Béton BCN 25	
Granulométrie	0/14
Ciment	CPJ 45 PM/32.5 R
Adjuvants	Pozzolith 200 NS - Pozzolith 390 HE
Fibres	Harbourite 300 6927 (13 mm)

Tableau 3.1 : Caractéristiques du béton employé pour la construction de la dalle d'essai n°2.

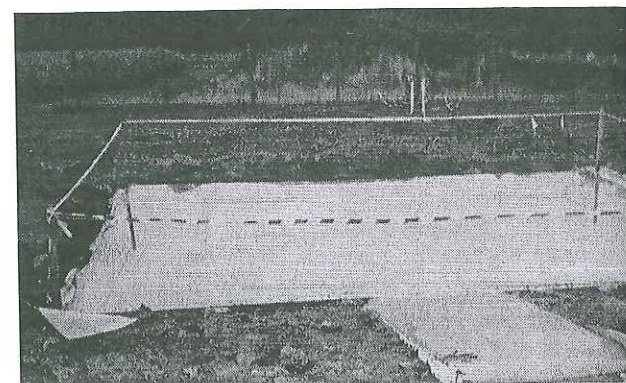
Pour assurer son homogénéité, nous avons choisi de ne pas vibrer ce béton. L'opération de vibration consiste à introduire une aiguille vibrante dans le béton encore frais pour faire remonter les bulles d'air généralement incluses dans le coulis de béton. On augmente ainsi la densité. Mais la vibration peut également aboutir à une certaine ségrégation en profondeur des différents constituants du béton, suivant le temps de vibration. Vibrer de façon équivalente tout le massif présente des difficultés. Cela risque d'influencer de façon non négligeable l'homogénéité du bloc. Nous avons donc choisi de ne pas recourir à la vibration en utilisant un fluidifiant synthétique (superplastifiant hautement réducteur d'eau). Ce produit associé à d'autres adjuvants (retardateur de prise, accélérateur de durcissement) facilite la mise en oeuvre du béton et permet de limiter le nombre de bulles d'air (Cf. Tableau 3.1).

Nous n'avons pas cherché, dans le cadre de cette thèse, à quantifier l'efficacité réelle et la pertinence de tous ces traitements. Notre objectif était d'obtenir un massif conforme à nos besoins : il ne présente pas de fissuration apparente et est homogène. Pour vérifier l'homogénéité du béton nous avons réalisé des mesures de vitesse d'ondes P et de vitesse de phase des ondes de Rayleigh par SASW (Cf. Figures 3.8 à 3.10).

¹ Dreux G., Festa J., 1995. *Nouveau guide du béton*. Ed. Eyrolles. Paris.



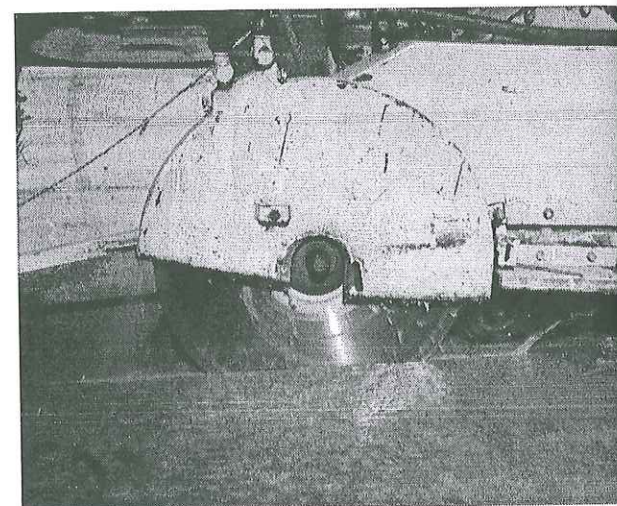
(a)



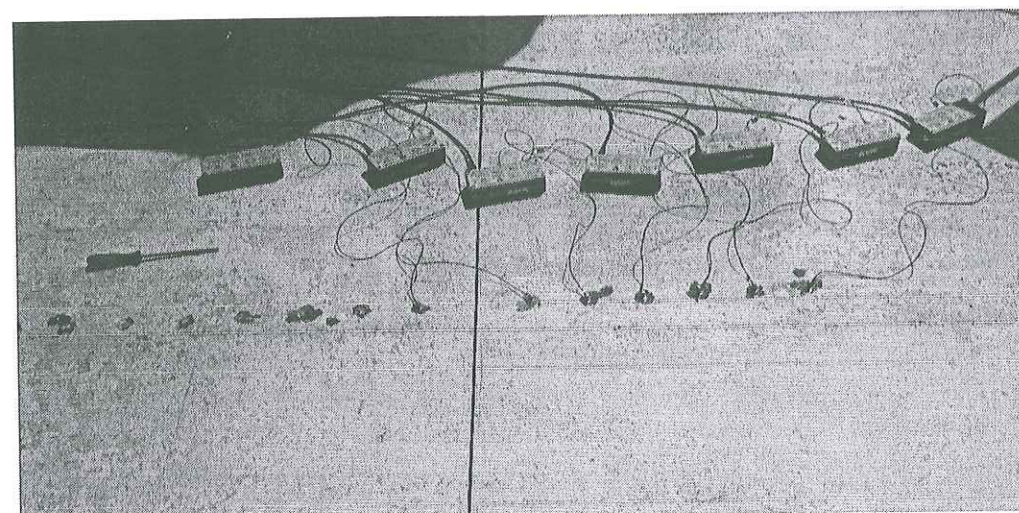
(c)



(b)



(d)



(e)

Figure 3.7 : Réalisation de la dalle n°2 à différentes étapes : montage du coffrage (a), coulage (b), séchage après lissage (c), introduction des «fissures» par sciage (d), auscultation de la fissure (e). Les taches de colle sur la gauche (e) correspondent à la localisation des capteurs lors de la série précédente. En effet, on ne dispose que d'un nombre limité de capteurs.

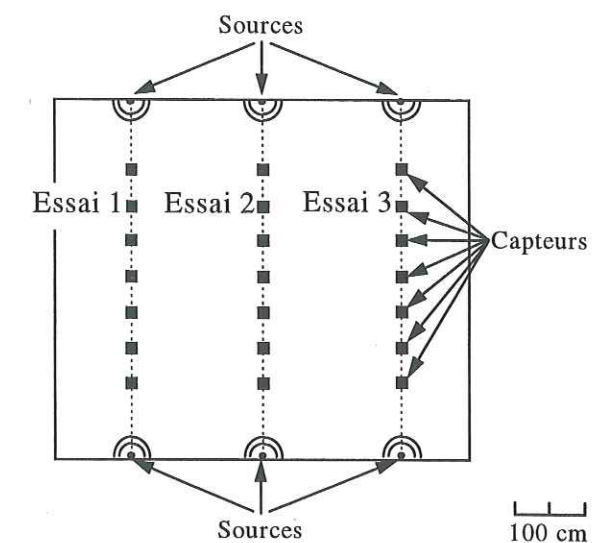


Figure 3.8: Schéma des trois dispositifs expérimentaux utilisés sur la dalle n°2 avant l'introduction des fissures pour les mesures de vitesse d'ondes P et d'ondes de Rayleigh.

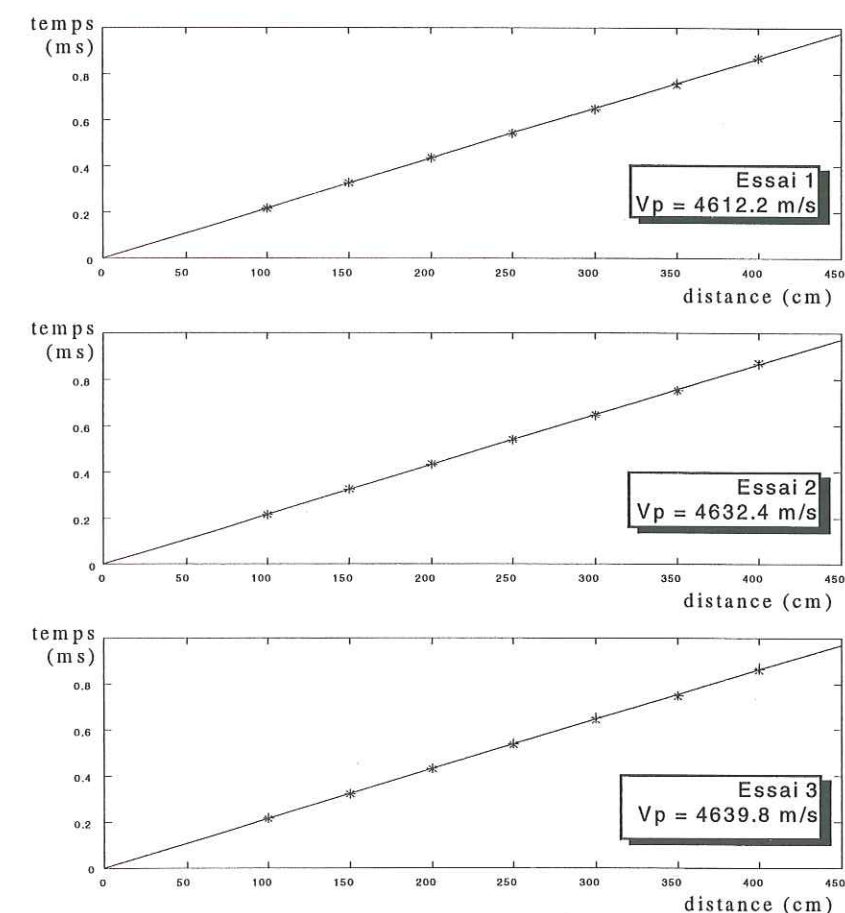


Figure 3.9 : Hodochrones établies avec les dispositifs de la Figure 3.8. Les vitesses présentées sont le résultat d'une régression linéaire pour chaque courbe. La vitesse moyenne est estimée à $4630 \text{ m/s} \pm 4\%$.

La vitesse des ondes P a été déterminée en pointant manuellement les premières arrivées sur les signaux enregistrés. On peut ainsi tracer les hodochrones (courbes temps-distance) et calculer la vitesse par régression linéaire (Cf. Figure 3.9). On obtient ainsi une vitesse constante pour les trois essais avec une valeur moyenne de $4630 \text{ m/s} \pm 185$ (soit 4%). L'incertitude de 4% correspond à une incertitude sur la position des capteurs de $\pm 1 \text{ cm}$ et une incertitude des pointés temporels de $\pm 30 \mu\text{s}$.

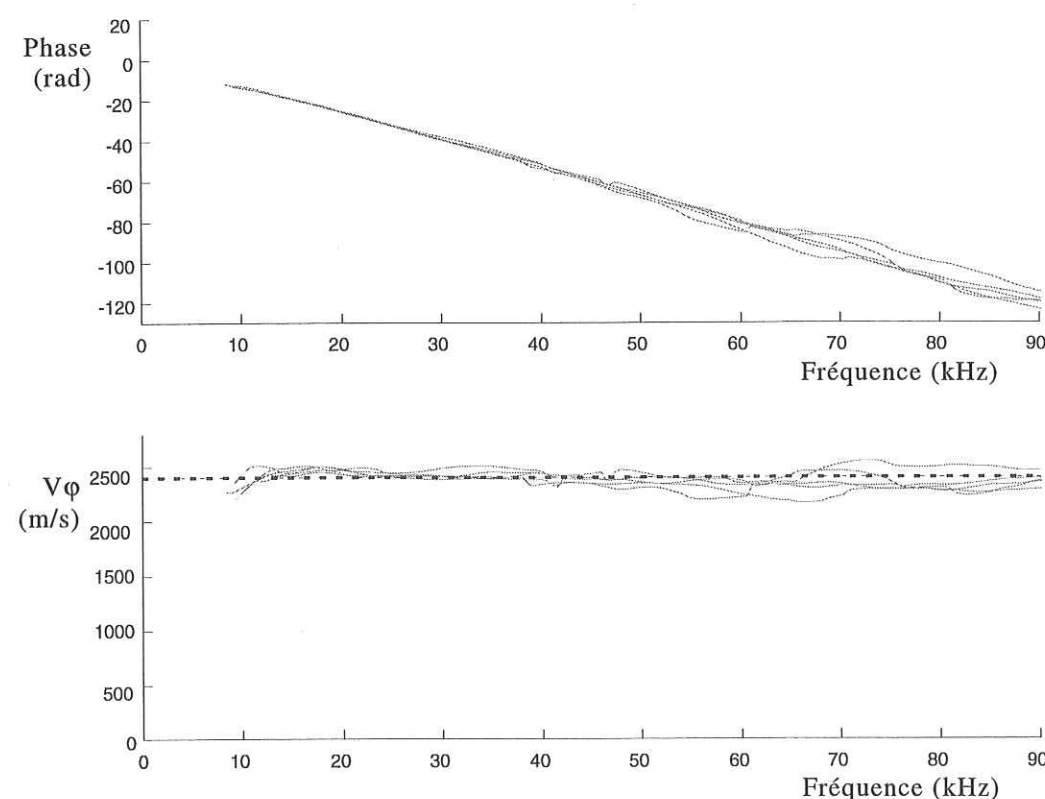


Figure 3.10 : Courbes de déphasage (phase "déroulée") et courbes de dispersion obtenus pour 6 couples de capteurs localisés à différents endroits de la dalle. La vitesse moyenne est estimée à $2403 \text{ m/s} \pm 220$ pour une bande de fréquence allant de 10 à 60 kHz.

Les enregistrements ont également été exploités pour des calculs de vitesse de phase des ondes de Rayleigh par SASW. Les courbes de dispersion obtenues pour 6 couples de capteurs (2 par essais, Cf. Figure 3.8) sont présentées Figure 3.10. Elles indiquent une même tendance : une vitesse constante de $2402 \text{ m/s} \pm 220$ dans toute la dalle et pour une bande de fréquences allant de 10 à 60 kHz. Pour les fréquences plus basses, la qualité des données que nous avons enregistrées ne nous permet pas d'obtenir des mesures fiables de vitesse de phase. Néanmoins les valeurs obtenues

sont confirmées par Brégent¹ sur cette même dalle, pour une bande de fréquence allant de 5 à 80 kHz, avec l'utilisation d'un dispositif mieux adapté (dispositif plus petit en "source commune" ou "point milieu commun").

Il apparaît donc que la dalle de béton est bien homogène en surface et en profondeur sur toute la zone d'essai. La vitesse des ondes P est en effet constante pour les trois essais en surface et aucune dispersion des ondes de surface n'a été détectée. Les valeurs de vitesse obtenues sont de 4630 m/s pour les ondes P et 2400 m/s pour les ondes de Rayleigh. Elles correspondent à un coefficient de Poisson de l'ordre de 0,27 et à une vitesse des ondes S de l'ordre de 2600 m/s .

Des fissures artificielles ont été introduites dans ce massif quelques mois après le coulage. Il s'agit de traits de scie de 2 m de long chacun, de profondeur variable : 4, 9 et 16 cm de profondeur (Cf. Figure 3.11). L'épaisseur des fissures est celle de la lame de scie, elle est 0,5 cm.

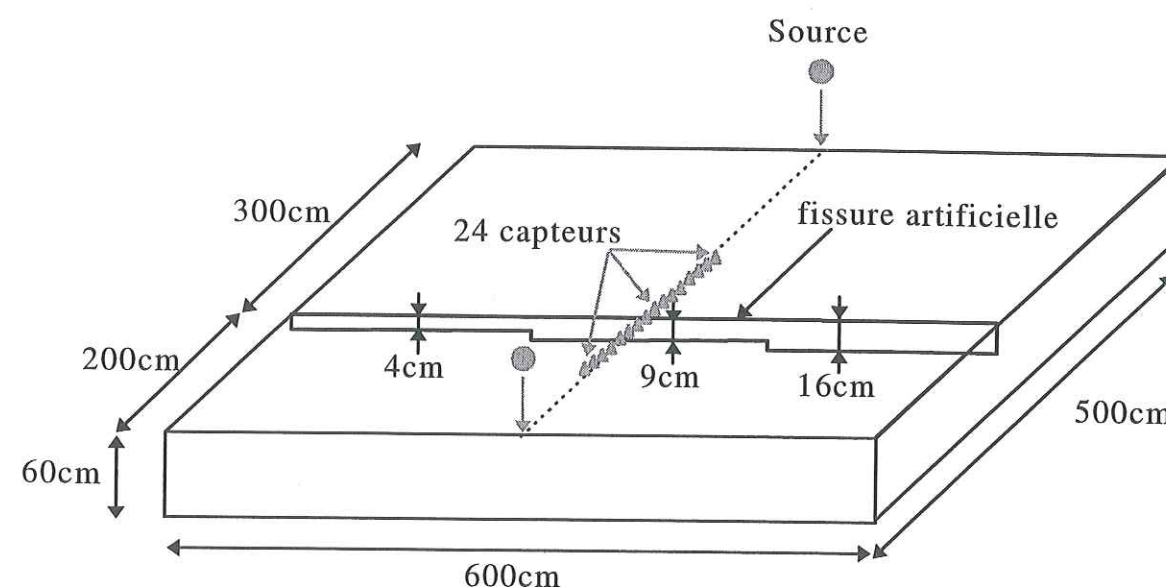


Figure 3.11: Schéma de la dalle d'essai n°2 avec le dispositif expérimental sur la fissure de 9 cm de profondeur.

¹Brégent S., 1998. communication personnelle et *Etude préliminaire des ondes de surfaces pour l'auscultation de bétons multicouches par SASW*. Rapport de stage de Maîtrise Sciences de la Terre, Faculté des sciences de Nantes

Nous disposons d'un massif en béton dont nous connaissons parfaitement les caractéristiques intrinsèques et géométriques. Ce site va nous permettre de réaliser plusieurs enregistrements de la propagation d'ondes de Rayleigh sur les fissures et de tester expérimentalement différentes méthodes d'évaluation de leur profondeur de pénétration.

3.2 DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET TRAITEMENTS PRELIMINAIRES DES SIGNAUX.

3.2.1 Le dispositif expérimental.

Afin d'observer expérimentalement l'influence d'une fissure de surface sur la propagation d'une onde de Rayleigh, nous avons disposé 24 capteurs (en 4 séries de 7 capteurs avec un capteur commun à chaque série) de part et d'autre de la fissure sur une ligne qui lui est perpendiculaire (Cf. Figure 3.11). La source est placée sur le bord de la dalle, le plus loin possible des capteurs afin de se placer en champ lointain et d'éviter l'effet de la première réflexion sur le bord de la dalle.

Chaque tir est répété plusieurs fois de façon la plus identique possible (hauteur de chute de la bille, localisation de l'impact, quantité d'énergie reçue au niveau des capteurs,...). La surface du béton est très irrégulière. Si l'impact a lieu sur un composant très dur comme un grain de sable ou sur le matériau liant plus "mou", la quantité d'énergie transmise au milieu sera très différente. Une variation de quelques millimètres de la localisation du point d'impact peut modifier la forme des signaux. Les tirs pour un dispositif de capteurs et une localisation de la source, sont répétés jusqu'à obtenir une dizaine de signaux visuellement similaires à l'enregistrement.

Pour le déclenchement de l'acquisition des signaux, on utilise un capteur proche du point d'impact. Dès qu'il reçoit une quantité d'énergie dépassant un seuil fixé, l'enregistrement est déclenché pour tous les capteurs. Un système de pré-déclenchement permet éventuellement d'obtenir les 0,4 ms précédant le début du signal sur les enregistrements. Les signaux sont enregistrés sur 4096 points avec une fréquence d'échantillonnage de 1 MHz soit une durée de 4,096 ms.

Chaque essai est réalisé une seconde fois en installant la source sur le bord opposé. On dispose ainsi pour un dispositif de capteurs, de deux essais similaires étant donné la géométrie du problème, la distance de la source à la fissure étant soit de 2 m soit de 3 m.

3.2.2 Sommation, filtrage et corrections.

Les enregistrements correspondant à 10 tirs identiques présentent parfois un léger décalage temporel. Celui-ci peut être dû à l'imprécision de la localisation de l'impact par rapport au capteur de déclenchement et au niveau du seuil de déclenchement pré-établi. Pour recalcr ces signaux, on calcule leur intercorrélacion. La position de son maximum par rapport au 0 indique directement le décalage recherché. On peut alors aligner les signaux avant de les sommer pour améliorer le rapport signal sur bruit.

Les signaux, une fois recalés et sommés sont ensuite filtrés par un filtre passe-bas adapté à la réponse impulsionnelle des capteurs (Cf. §3.1.1.a). On les corrige ensuite de l'atténuation due à l'expansion géométrique en prenant en compte la distance qui sépare chaque capteur de la source. Du fait qu'elles se propagent sur un front d'onde cylindrique, les ondes de Rayleigh s'atténuent en $r^{-1/2}$. Cette correction permet en ce qui concerne l'amortissement de se rapprocher du cas idéal où la source est située à l'infini.

Ces traitements préliminaires ne présentent a priori aucune difficulté de mise en oeuvre et peuvent être facilement automatisés. Dans l'objectif d'améliorer la procédure expérimentale, ils pourraient être intégrés à la procédure d'acquisition. Cela permettrait de limiter considérablement le nombre de données à stocker et de pouvoir passer plus rapidement à l'interprétation des signaux obtenus sans alourdir la mise en oeuvre expérimentale.

3.2.3 Résultats.

Les signaux enregistrés avec le dispositif expérimental de la Figure 3.11 sont présentés sur la Figure 3.12. Pour cet essai, 12 capteurs sont placés de chaque côté de la fissure symétriquement par rapport à celle-ci. La distance inter-capteurs est de 10 cm. La zone de localisation des capteurs s'étend de -1,20 m à +1,20 en prenant la fissure pour origine. La source est située au bord Est de la dalle à 1,80 m du premier capteur.

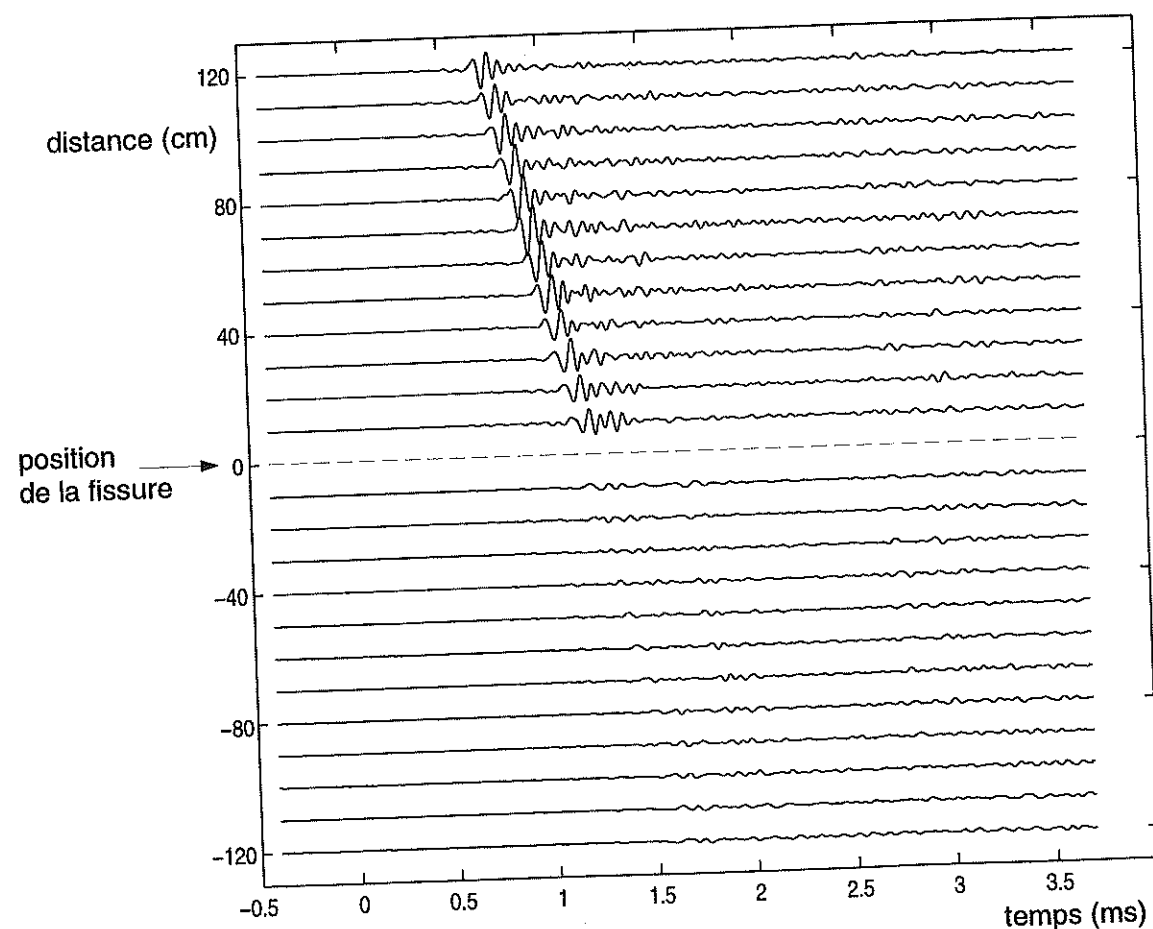


Figure 3.12: Signaux expérimentaux enregistrés sur la fissure de 9 cm de profondeur sur la dalle n°2. La source (bille de 12 mm de diamètre) est située à 3 m de la fissure (+300). L'amplitude des traces est normalisée sur le maximum obtenu.

La première observation concerne la faible amplitude des signaux enregistrés après la fissure. L'onde de Rayleigh incidente est facilement observable avant la fissure (elle correspond à l'onde la plus la plus énergétique) mais elle n'est plus aussi

largement dominante après la fissure. Cette perte d'amplitude souligne l'importance du rôle de la fissure sur la propagation de l'onde de Rayleigh.

On notera également que, l'onde incidente mise à part, aucun train d'onde n'est clairement identifiable (réflexion sur la fissure, réflexions sur les bords...). Au bout de 4 ms d'enregistrement, le signal garde encore une amplitude très supérieure au niveau de bruit initial. Ce bruit a deux origines : les réflexions sur les bords de la dalle et la diffraction.

Les réflexions

Les différents bords de la dalle provoquent des réflexions multiples. Si le signal source est bref, les premières réflexions peuvent être facilement identifiables, leur énergie s'atténue au fur et à mesure.

La diffraction

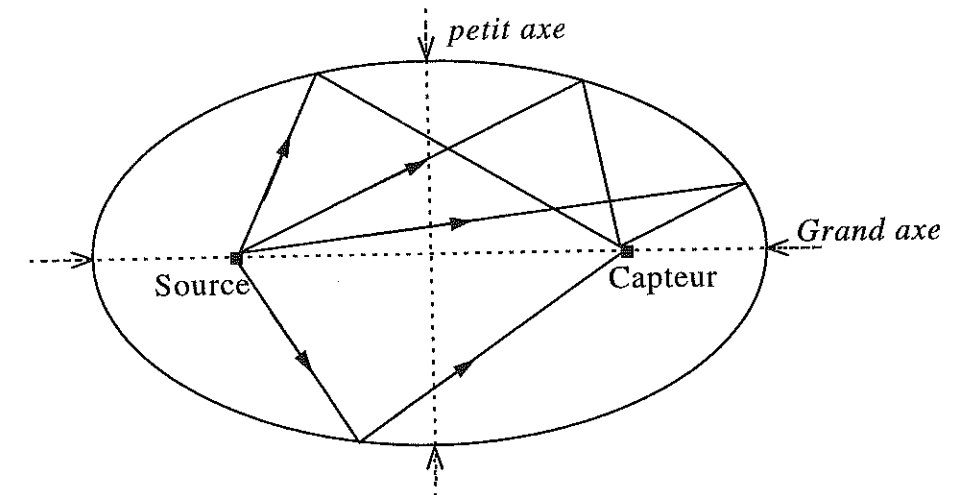


Figure 3.14 : Schéma du volume échantillonné par les ondes diffractées et enregistrées à un instant t . La source et le capteur sont les foyers de l'ellipse, son grand axe est égal à Vt .

La seconde origine de bruit est liée à l'hétérogénéité du milieu de propagation. Ce bruit est interprété comme le résultat de la rétro-diffraction des ondes directes sur des hétérogénéités discrètes uniformément réparties dans le milieu. Considérons une onde de surface se propageant avec une vitesse V dans un milieu présentant des

hétérogénéités uniformément réparties et dont la taille est du même ordre de grandeur que la longueur de l'onde. Considérons un instant t mesuré à partir du temps origine de la source, les ondes enregistrées à cet instant ont suivi un trajet plus long que l'onde directe. Dans l'hypothèse où elles n'ont été diffractées qu'une seule fois (hypothèse de diffraction simple), on peut localiser les hétérogénéités sur une ellipse dont les foyers sont le point source et le point de localisation du capteur. Le grand axe de cette ellipse est égal à $V.t$ (Cf. Figure 3.14). Dans l'hypothèse de diffractions multiples, les hétérogénéités sont localisées à l'intérieur de l'ellipse. Si l'onde est une onde de volume, les hétérogénéités seront contenues dans un ellipsoïde ayant les mêmes caractéristiques. Cette interprétation permet de comprendre pourquoi avec un impact très bref, on enregistre même à très courtes distances un signal beaucoup plus long. Le phénomène de diffraction provoque une dispersion de l'énergie dans le milieu et participe à l'atténuation des ondes.

De l'observation des signaux expérimentaux, il apparaît que le bruit généré par la diffraction et par les réflexions sur les bords, empêche toute analyse temporelle fine des différents phénomènes de diffraction de l'onde sur la fissure. Les phénomènes mis en évidence par l'observation des données numériques (réflexion sur la fissure, onde de Rayleigh transmise "autour" de la fissure,... Cf. Chap. 2, §2.3.2.) ne sont pas observables ici. Une analyse des différents temps d'arrivées pour évaluer la profondeur de la fissure, ne paraît donc pas possible. Les techniques temporelles mises en oeuvre pour auscultation ultrasonique des métaux ne semblent pas directement transférables à l'auscultation du béton étant donné l'hétérogénéité de ce matériau.

3.3 CONCLUSION.

Pour étudier expérimentalement l'interaction des ondes de Rayleigh avec des fissures de surface dans le béton, nous avons construit un site expérimental en béton présentant des fissures artificielles obtenues par sciage. Nous avons étudié et choisi le matériel expérimental le mieux adapté à nos moyens et à nos objectifs. Nous avons ainsi procédé à des essais réels et utilisé des traitements simples (sommation, filtrage) pour améliorer la qualité des signaux.

L'onde de Rayleigh générée est clairement identifiable sur ces signaux, elle apparaît comme la plus énergétique. Elle est fortement atténuée après la fissure. L'influence d'une fissure de surface sur la propagation de ce type d'onde a ainsi pu être mise en évidence de façon expérimentale.

Les signaux obtenus présentent néanmoins une quantité importante de bruit lié à l'interaction des ondes avec les limites de la structure et aux diffractions multiples qui ont lieu dans le matériau. Ce bruit interdit une analyse temporelle fine des différents trains d'onde. Il masque les phénomènes de diffraction sur la fissure, phénomènes identifiés de façon théorique par l'observation des données numériques.

Etant donnée l'origine du bruit, il ne paraît pas possible de le limiter de façon significative par des traitements classiques. En effet ce bruit est inhérent au matériau lui-même et à la taille de la structure. On ne peut guère augmenter la taille de la dalle ni modifier l'hétérogénéité du matériau. Travailler à plus basse fréquence permettrait sans doute de diminuer un peu la diffraction due aux hétérogénéités de petites tailles mais cela limiterait nos capacités en matière de détection et de caractérisation de fissure.

Une autre approche pour l'analyse de ces signaux s'avère donc indispensable. Nous avons orienté nos recherches vers le domaine fréquentiel. En effet, si certains phénomènes sont masqués par le bruit dans le domaine temporel, leur analyse dans le domaine des fréquences peut révéler des informations sur les caractéristiques géométriques de la fissure.

Chapitre 4

Méthodes d'évaluation de la profondeur de pénétration des fissures de surface

Chapitre 4

Méthodes d'évaluation de la profondeur de pénétration des fissures de surface.

La majeure partie du travail présenté dans ce chapitre (§§4.1 à 4.3) a fait l'objet d'un article publié dans le journal *Non-Destructive Testing & Evaluation International*, (Vol. 31, No. 4, pp 289-297, 1998, Elsevier Sciences Ltd, Cf. Annexe). En complément et à titre de comparaison, la méthode classique d'auscultation sonore des fissures de surface est présentée au §4.4.

4.1 ANALYSE SPECTRALE DES DIFFERENTS TRAINS D'ONDES DIFFRACTES PAR LA FISSURE.

A partir de l'observation des signaux expérimentaux et numériques, nous avons vu que l'analyse temporelle des différents phénomènes reste très délicate. L'évaluation de la profondeur de pénétration de la fissure de surface à partir de la mesure de temps ne paraît pas être une méthode prometteuse. L'interprétation de la figure de diffraction d'une onde de Rayleigh sur une fissure de surface (Cf. Chap. 2, §2.3.3) permet de supposer que certains phénomènes seraient plus facilement observables dans le domaine fréquentiel. Une analyse des signaux numériques dans ce domaine permettrait d'orienter les recherches pour développer une méthode spectrale d'évaluation de profondeur de fissure.

Selon le modèle proposé par Burger et Testa¹ et confirmé par les résultats de notre modélisation numérique (Cf. Chap. 1, §1.3.4.c et Chap. 2, §2.3.3.b), le spectre de l'onde transmise serait qualitativement composé de basses fréquences par rapport à l'onde incidente.

¹ Burger C.P., Testa A., 1981. Rayleigh wave spectroscopy to measure the depth of surface cracks, Proceedings of the thirteenth symposium on non destructive evaluation, San Antonio TX, April 21-23.

Les ondes directement transmises sont celles dont la profondeur de pénétration est supérieure à celle de la fissure et qui se propagent en partie "sous" la fissure. La profondeur de pénétration d'une onde étant proportionnelle à sa longueur d'onde, seules les ondes de basses fréquences (soit de grandes longueurs d'ondes) peuvent ainsi être transmises. Les ondes de hautes fréquences qui ne se propagent qu'à des profondeurs inférieures à celle de la fissure vont, elles, être particulièrement affectée par la présence de cette fissure. Elles vont être majoritairement réfléchies ou transmises par propagation "autour" de la fissure (en négligeant les phénomènes de conversion de mode onde de surface-onde de volume).

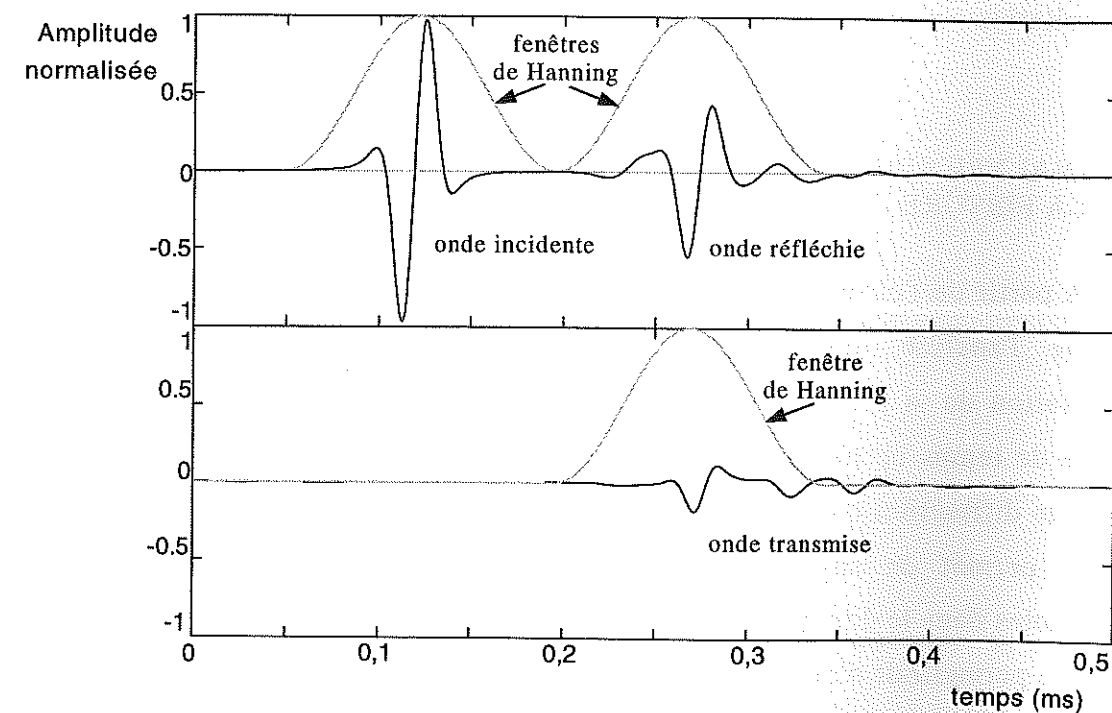


Figure 4.1 : Sélection des différents trains d'ondes sur les signaux synthétiques par fenêtrage. L'onde incidente et l'onde réfléchie sont sélectionnés sur un signal enregistré avant la fissure (en haut), l'onde transmise sur un signal enregistré après la fissure (en bas). La profondeur de la fissure est de 10 cm. Les capteurs sont situés à 20 cm de la fissure symétriquement par rapport à celle-ci.

L'analyse des signaux numériques permet de vérifier ces phénomènes. La première étape consiste à sélectionner les trains d'ondes résultant des différents

phénomènes : l'onde incidente, l'onde réfléchie, l'onde transmise directement. Des fenêtres temporelles sont placées de façon à isoler chaque train d'onde sur les signaux synthétiques. Une transformation de Fourier est ensuite effectuée sur chacune de ces fenêtres. Afin de pouvoir calculer des transformées de Fourier dans de bonnes conditions, nous avons utilisé une fenêtre de Hanning classique centrée sur l'impulsion correspondant au train d'onde analysé (Cf. Figure 4.1).

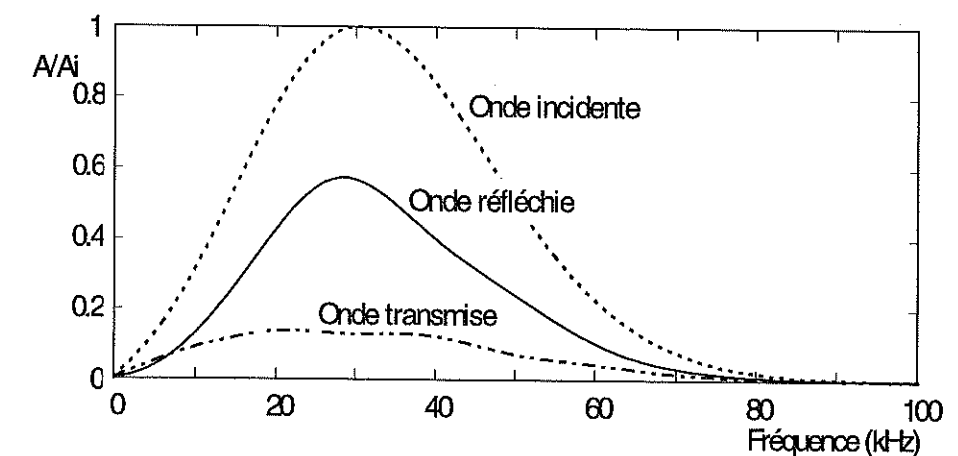


Figure 4.2 : Spectre des différents trains d'onde sélectionnés par fenêtrage sur les signaux synthétiques de la Figure 4.1.

Les spectres correspondant sont présentés Figure 4.2. Celui de l'onde incidente correspond bien au spectre d'une impulsion de Ricker de fréquence centrale 30 kHz qui est l'impulsion incidente choisie pour la modélisation des signaux. Les spectres des ondes réfléchie et transmise, moins énergétiques, ont des formes légèrement différentes. L'onde réfléchie semble être composée de plus de hautes fréquences (pente du spectre moins raide que pour l'onde incidente à hautes fréquences) tandis que l'onde transmise semble avoir une dominante basse fréquence.

Pour visualiser les particularités des spectres des ondes réfléchie et transmise en comparaison du spectre de l'onde incidente, les rapports de ces spectres ont été calculés (Cf. Figure 4.3). Ces rapports mettent clairement en évidence que les hautes fréquences qui composent l'onde réfléchie ne sont pas transmises au-delà de la fissures. La fissure joue le rôle pour l'onde de Rayleigh d'un filtre passe-bas en

transmission et d'un filtre passe-haut en réflexion. La fréquence limite au-dessous de laquelle les basses fréquences sont transmises ou au-dessus de laquelle les hautes fréquences sont réfléchies ne dépend théoriquement que de la profondeur de la fissure. Plus la fissure est profonde, plus les longueurs d'ondes pouvant se propager "sous" la fissure seront grandes et inversement.

Les caractéristiques spectrales des différents trains d'ondes sont clairement mises en évidence. On pourra remarquer un léger redressement à haute fréquence de la courbe de rapport onde transmise/onde incidente. Ce redressement est sans doute lié aux ondes qui sont transmises "autour" de la fissure, il faut cependant remarquer que les quantités d'énergies mises en jeu pour ces fréquences (supérieures à 60 kHz) sont très faibles par rapport à l'énergie se propageant pour des fréquences proches des 30 kHz (fréquence centrale du signal source).

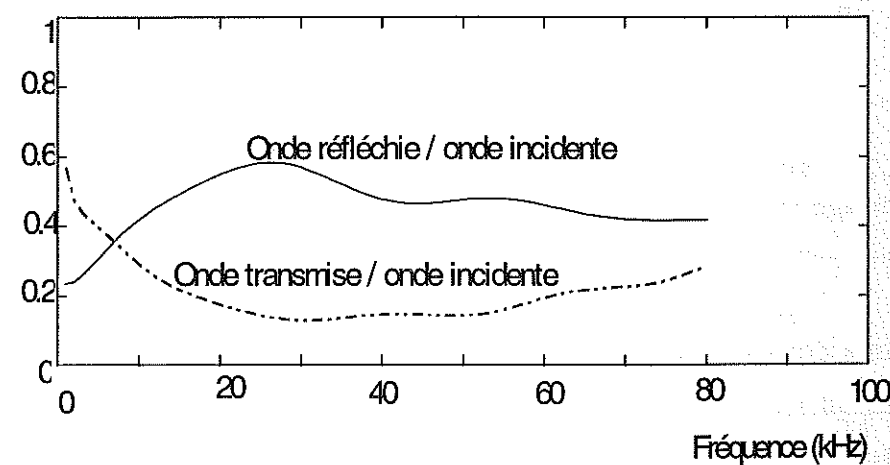


Figure 4.3 : Rapport du spectre de l'onde réfléchie et de l'onde transmise sur le spectre de l'onde incidente pour une fissure de 10 cm de profondeur.

On notera que, pour faire cette analyse, nous avons sélectionné les trains d'onde dans le domaine temporel. Si la précision des signaux synthétiques le permet, il n'en est pas de même pour les signaux expérimentaux. En effet, dans ce cas, les trains d'ondes ne sont pas aussi clairement identifiables et ne sont pas aussi bien séparés. Il paraît difficile de les isoler par fenêtrage temporel pour les analyser.

4.2 METHODE D'ANALYSE SPECTRALE.

4.2.1 Principe.

Sur les signaux synthétiques comme expérimentaux, on observe que le train d'onde les plus énergétiques avant la fissure est l'onde incidente et après la fissure, l'onde directement transmise. Dans le spectre du signal entier, les caractéristiques de ces trains d'ondes seront dominantes. Pour comparer ces caractéristiques spectrales, on peut calculer le rapport de spectre de deux signaux enregistrés après et avant la fissure. Ce rapport va nous permettre d'évaluer la bande de fréquence de l'énergie transmise au-delà de la fissure. Cette information sera néanmoins perturbée puisque les signaux utilisés pour le calcul contiennent des trains d'onde supplémentaires à l'onde incidente et à l'onde transmise : onde réfléchie, ondes de volumes... On peut notamment remarquer que, sur les signaux synthétiques, l'énergie de l'onde réfléchie est relativement élevée par rapport à celle de l'onde transmise. Cependant cette onde réfléchie a théoriquement un contenu spectral haute fréquence. Cela devrait amplifier le phénomène de filtrage passe-bas entre l'onde incidente et l'onde transmise.

Ce calcul a d'abord été effectué avec les signaux synthétiques. Le programme de modélisation effectuant les calculs dans le domaine des fréquences, nous avons utilisé les signaux bruts sans convolution avec un signal source. Nous avons fait le rapport d'un signal fréquentiel enregistré par un pseudo-capteur situé après la fissure, théoriquement représentatif de l'onde transmise, et d'un signal enregistré avant la fissure représentatif de l'onde incidente. Selon le modèle théorique de Burger et Testa¹ que nous avons pu confirmer et compléter grâce à la modélisation numérique (Cf. Chap. 2), la position des capteurs par rapport à la fissure ne devrait pas avoir d'influence. En effet, dans le cas de signaux synthétiques, il n'y a pas d'amortissement, l'onde incidente et l'onde transmise restent identiques lors de leur propagation. La position à laquelle elles sont enregistrées par rapport à la fissure, ne

¹ Burger C.P., Testa A., 1981. Rayleigh wave spectroscopy to measure the depth of surface cracks, Proceedings of the thirteenth symposium on non destructive evaluation, San Antonio TX, April 21-23.

devrait donc pas avoir d'influence. Cette position va néanmoins jouer un rôle du fait de la présence de l'onde réfléchie et des autres trains d'ondes. Le signal de l'onde réfléchie représente une répétition du signal de l'onde incidente décalé d'un certain temps. Suivant la position par rapport à la fissure, ce temps est plus ou moins long et cela modifie le spectre fréquentiel par phénomène d'interférences constructives ou destructives (Cf. Figure 4.5). Pour minimiser l'influence de ce genre de phénomène, on calcule les rapports de spectre d'un grand nombre de couples de signaux. On effectuera un lissage léger des courbes de rapports obtenues par moyenne glissante. Cela permet de minimiser les petites fluctuations des courbes sans altérer son allure générale. Dans le cas des courbes numériques, la longueur de la fenêtre utilisée pour ce lissage est de deux points (soit 2 kHz). On effectue enfin une moyenne de tous les rapports.

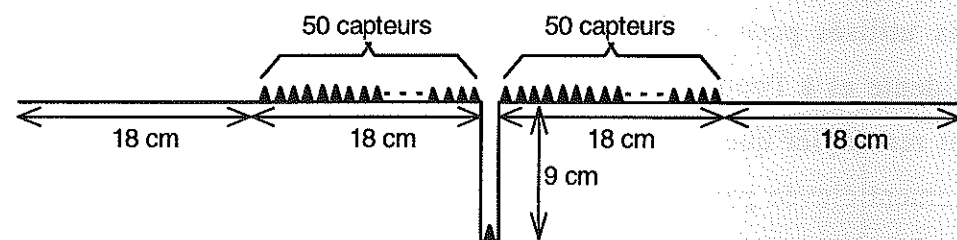


Figure 4.4 : Schéma du modèle numérique utilisé pour l'étude de la fissure de 9 cm de profondeur. La distance intercapteurs est de 0,36 cm. La distance entre deux capteurs d'un couple utilisé pour le rapport spectral est de 18,72 cm.

Les données synthétiques que nous avons utilisées ont été calculées pour le modèle présenté Figure 4.4. Pour le calcul des rapports de spectres, nous avons choisi de sélectionner les couples avec une même distance d'un capteur à l'autre. Elle correspond à la distance entre le premier capteur avant la fissure et le premier capteur après la fissure (suivant le sens de propagation de l'onde). Cela permet d'utiliser toutes les données pour le calcul et d'obtenir ainsi 50 couples de capteurs. Ce choix des couples de capteurs séparés par une distance fixe est fait dans l'optique d'une application expérimentale de cette méthode. Pour les signaux expérimentaux, les effets de l'amortissement intrinsèque ne seront pas corrigés. Pour pouvoir comparer les courbes de rapports les unes aux autres, il est intéressant de les calculer pour un amortissement similaire donc avec une distance identique d'un capteur à l'autre. Nous

avons également fait ce choix pour les données numériques pour garder une procédure de traitement identique. D'autres configurations de couples ont été testées, elles donnent des résultats semblables si tous les signaux sont utilisés le même nombre de fois (calcul avec tous les couples possibles, avec des couples symétriques par rapport à la fissure,...).

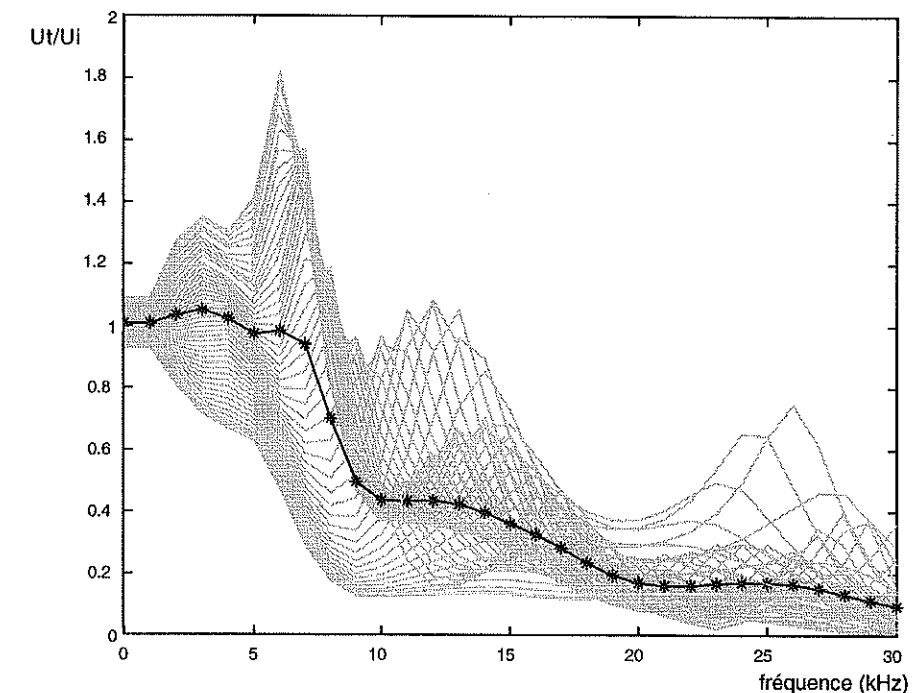


Figure 4.5 : Courbe moyenne (en noire) du rapport spectral de l'onde transmise sur l'onde incidente calculée à partir de signaux synthétiques pour une fissure de 9 cm de profondeur et 0,5 cm d'épaisseur. Les fluctuations des courbes grises sont associées aux interférences constructives ou destructives des différents trains d'onde contenus dans les signaux.

La Figure 4.5 présente ainsi les rapports spectraux de signaux enregistrés par les 50 couples de capteurs. La courbe en noir est la courbe moyenne. Elle part d'une valeur de rapport proche de 1 et chute brutalement à une fréquence d'environ 8 kHz pour atteindre une valeur inférieure à 0,5. Des fluctuations de la courbe avant et après la chute sont observables mais elles restent limitées. Les basses fréquences sont transmises au-delà de la fissure avec une énergie comparable à celle de l'onde incidente, l'énergie transmise à hautes fréquences est significativement plus faible. Ce calcul permet donc de mettre en évidence le phénomène de filtrage des ondes de Rayleigh par la fissure.

Le modèle qui permet d'obtenir les signaux synthétiques, utilise des grandeurs géométriques et temporelles normalisées. On peut à partir d'un même calcul retransformer ces grandeurs avec le coefficient que l'on souhaite. On obtient ainsi la modélisation de différentes fissures homothétiques. On peut ainsi effectuer le calcul du rapport spectral des ondes transmise et incidente comme précédemment pour des fissures allant de 2 à 18 cm de profondeur. Les courbes obtenues ont la même forme, elles sont seulement multipliées en fréquence et on constate que plus la fissure est profonde, plus la fréquence à laquelle intervient la coupure est basse (Cf. Figure 4.6).

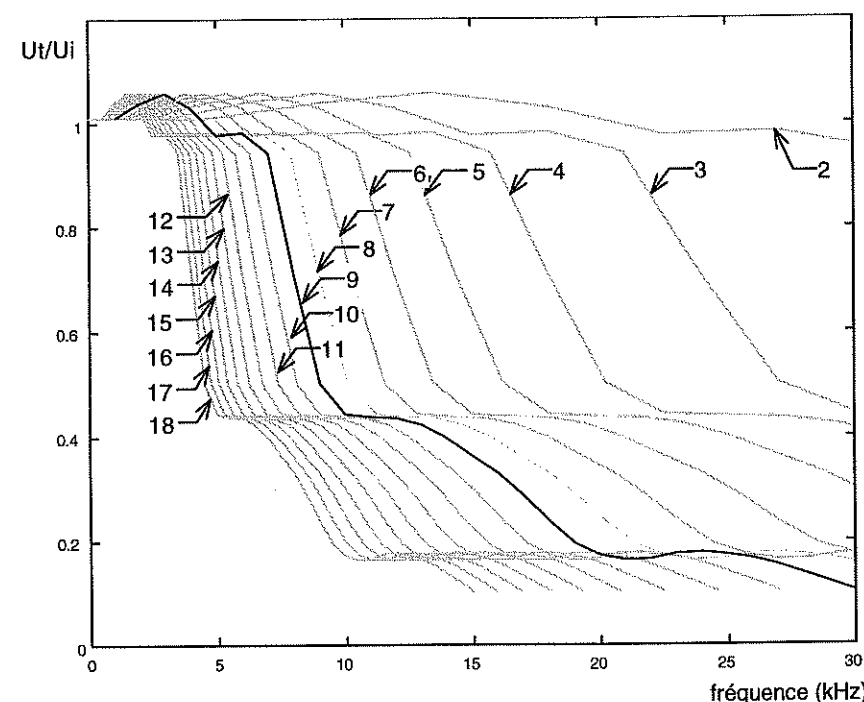


Figure 4.6 : Rapports de spectres calculés à partir de données numériques. Le numéro de chaque courbe correspond à la profondeur de la fissure en cm. La courbe en noir est la courbe moyenne de la Figure 4.5.

A partir des signaux complets, sans sélection temporelle des trains d'ondes concernés, nous avons mis en évidence l'influence de la profondeur de la fissure sur le phénomène de filtrage de l'onde de Rayleigh. Pour établir une relation entre fréquence et profondeur, il est nécessaire, de définir précisément et objectivement la fréquence à laquelle intervient la coupure pour des fissures de différentes profondeurs. Par analogie avec les filtres, on appellera cette fréquence la "fréquence de coupure".

4.2.2 Localisation de la fréquence de coupure, évaluation de la profondeur de pénétration des fissures.

Pour définir la fréquence de coupure de façon objective, plusieurs possibilités sont envisageables en fonction des caractéristiques des courbes de rapport de spectre. Une courbe de rapport de spectre commence à basse fréquence par un palier à 1 avec une pente proche de 0, elle chute à une certaine fréquence avec une pente qui peut être importante puis atteint un nouveau palier inférieur à 0,5 avec une pente proche de 0. On pourrait sélectionner une fréquence à partir de laquelle la chute commence ou finit, ou déterminer la fréquence correspondant à un seuil intermédiaire du rapport (entre 1 et 0,5). Une autre approche pourrait consister à calculer au lieu d'une fréquence, la pente de la chute puisque celle-ci semble proportionnelle à la profondeur de la fissure. Ces différentes possibilités ont été testées, elles présentent des petites différences, des avantages et des inconvénients suivant les cas particuliers d'application.

Nous avons retenu un critère qui est utilisable pour la plus large gamme de profondeurs de fissure possible. Nous proposons de calculer point à point la pente $A(f)$ de la courbe de rapport de spectre $RS(f)$ avec une expression du type :

$$A(f_1) = \frac{RS(f_2) - RS(f_1)}{f_2 - f_1} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

La courbe de pente $A(f)$ en fonction de la fréquence est présentée Figure 4.7. Elle présente des valeurs proches de 0, un pic négatif qui correspond à la chute de la courbe de rapport de spectre et de nouveau un palier proche de 0. On considérera qu'une pente comprise entre 0,075 et -0,075 reste proche de 0, les légères oscillations que l'on peut observer dans les paliers ayant des amplitudes comprises dans cet intervalle. Une valeur inférieure correspond à la phase de chute. On définira la fréquence de coupure f_c au point de fin de chute, là où la pente redevient supérieure à -0,075 après le pic négatif.

La valeur critique de 0,075 a été établie à partir de l'observation, elle résulte d'un compromis entre l'amplitude des oscillations dans les zones de palier et la valeur de l'extremum dans la phase de chute.

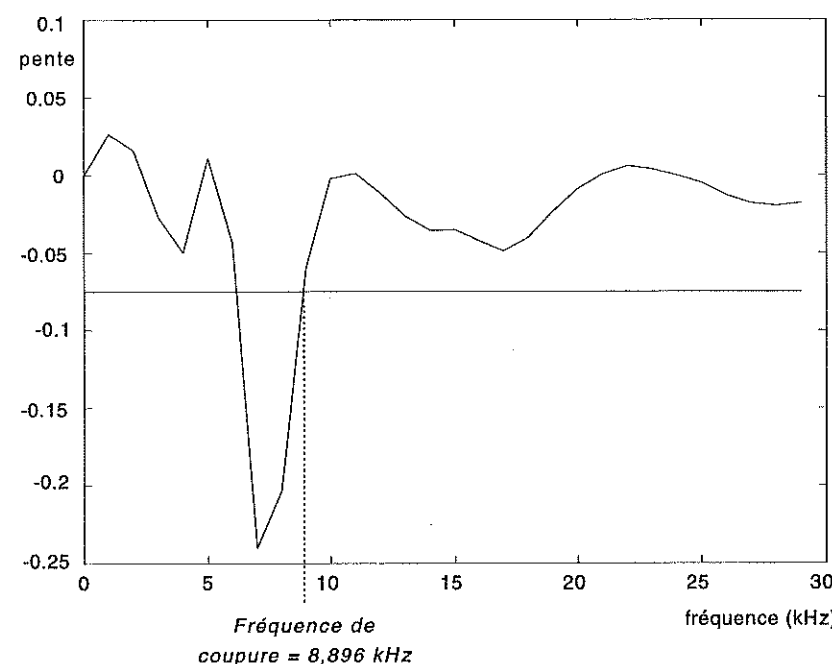


Figure 4.7 : Pente de la courbe de rapport de spectres pour la fissure de 9 cm de profondeur. La fréquence de coupure est établie au moment où la pente redevient supérieure à -0,075.

Le point d'intersection entre la courbe de pente et le seuil de -0,075 correspond physiquement à la fréquence à partir de laquelle l'énergie n'est plus transmise directement au-delà de la fissure. On pourrait choisir un autre point de cette courbe (début du pic, minimum,...) avec un critère similaire. Notre choix s'est porté sur la fin de la chute, la fréquence de coupure a ainsi un réel sens physique. De plus, sa détermination est fiable pour différents types de fissure.

Dans le cas d'une fissure de 9 cm de profondeur, on trouve une fréquence de coupure de $8,89 \pm 0,5$ kHz soit une longueur d'onde de $26,0 \pm 1,4$ cm en utilisant la vitesse de l'onde de Rayleigh définie pour la modélisation ($V_R = 2318,5$ m/s).

En suivant ce critère, on peut établir la fréquence de coupure pour les rapports de spectres des fissures de différentes profondeurs. Ces fréquences sont proportionnelles puisque les courbes de rapports de spectres sont issues du même calcul renormalisé. On obtient donc une relation linéaire entre la longueur d'onde λ_c et la profondeur h de la fissure :

$$h = \frac{\lambda_c}{2,86} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

\Rightarrow

$$h = \frac{V_R}{2,86 * f_c} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

La valeur de 2,86 très proche de 3 correspond à la théorie puisqu'on considère en général que dans le cas d'une onde de Rayleigh, la majeure partie de l'énergie se propage à une profondeur inférieure à 1/3 de la longueur d'onde¹. Dans le cas de la fissure de 9 cm de profondeur, on calcule une profondeur de $9,1 \pm 0,5$ cm.

On peut noter que Burger et Testa² proposent également une méthode d'évaluation de la profondeur des fissures de surface par la mesure d'une fréquence de coupure. Leur procédure expérimentale est très différente puisque la qualité des signaux qu'ils obtiennent sur le matériau (le métal) leur permet une certaine sélection temporelle des différents trains d'ondes. Il établissent ensuite la fréquence de coupure visuellement sans procédure de détermination automatique. La relation entre la fréquence de coupure et la profondeur de fissure qu'ils proposent est :

$$h = \frac{V_R}{1,22 * f_c} \quad (\text{Eq. 4.4}).$$

Cette relation est différente de celle que l'on trouve (la profondeur est de l'ordre de la longueur d'onde plutôt que du tiers de la longueur d'onde). Néanmoins les différences de procédure expérimentale et leur système de détermination de f_c peuvent suffire à expliquer cette différence. Le fait qu'ils travaillent sur des matériaux métalliques avec des caractéristiques mécaniques propres peut également modifier la répartition de l'énergie en profondeur en fonction de la longueur d'onde³.

¹ Richart F.E., Hall J.R., Woods R.D., 1970. *Vibrations of soils and foundations* (Prentice Hall), Englewood Cliffs, New Jersey.

² Burger C.P., Testa A., 1981. Rayleigh wave spectroscopy to measure the depth of surface cracks, Proceedings of the thirteenth symposium on non destructive evaluation, San Antonio TX, April 21-23.

³ Richart F.E., Hall J.R., Woods R.D., 1970. *Vibrations of soils and foundations* (Prentice Hall), Englewood Cliffs, New Jersey

4.2.3 Influence de l'épaisseur de la fissure.

Les données que nous avons utilisées pour établir la relation entre la profondeur de la fissure et la fréquence de coupure sont issues d'un seul calcul, les différentes profondeurs étant obtenues par une modification du facteur de normalisation utilisé pour la modélisation. Les fissures modélisées sont toutes homothétiques les unes par rapport aux autres, l'épaisseur variant en même temps que la profondeur. Ainsi la fissure de 9 cm de profondeur a une épaisseur de 0,5 cm, celle de 4 cm, une épaisseur de 0,22 cm et celle de 16 cm, une épaisseur de 0,89 cm.

Théoriquement l'épaisseur de la fissure n'a pas d'influence parce que le phénomène de filtrage lié à la fissure ne dépend que de la profondeur de celle-ci. Dans le cas numérique, par rapport aux longueurs d'ondes concernées, l'épaisseur de la fissure peut être considérée comme très faible (environ 2% de λ_c). On néglige cette épaisseur et l'extrémité de la fissure est assimilée à un point.

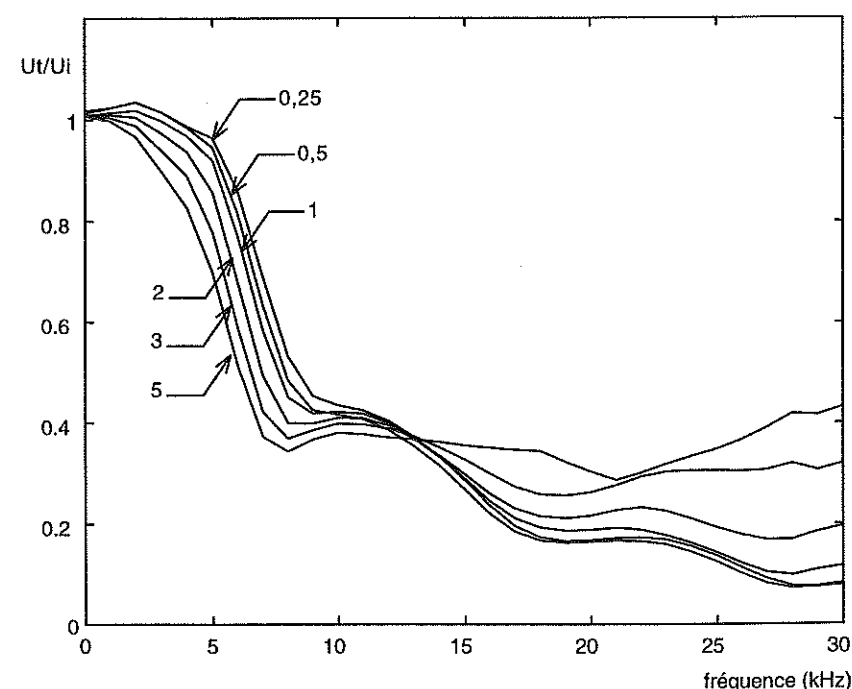


Figure 4.8 : Rapports de spectres calculés à partir de données numériques pour une fissure de 10 cm de profondeur. Le numéro de chaque courbe indique l'épaisseur de la fissure en cm

Néanmoins, pour évaluer l'influence réelle de l'épaisseur de la fissure, nous avons réalisé différents modèles de fissures d'une profondeur constante de 10 cm avec une épaisseur variant de 0,25 cm à 5 cm. Les rapports spectraux calculés pour ces modèles de fissures sont présentés Figure 4.8. On constate une modification sensible des rapports de spectre : plus la fissure est épaisse, plus la coupure d'énergie a lieu à basse fréquence.

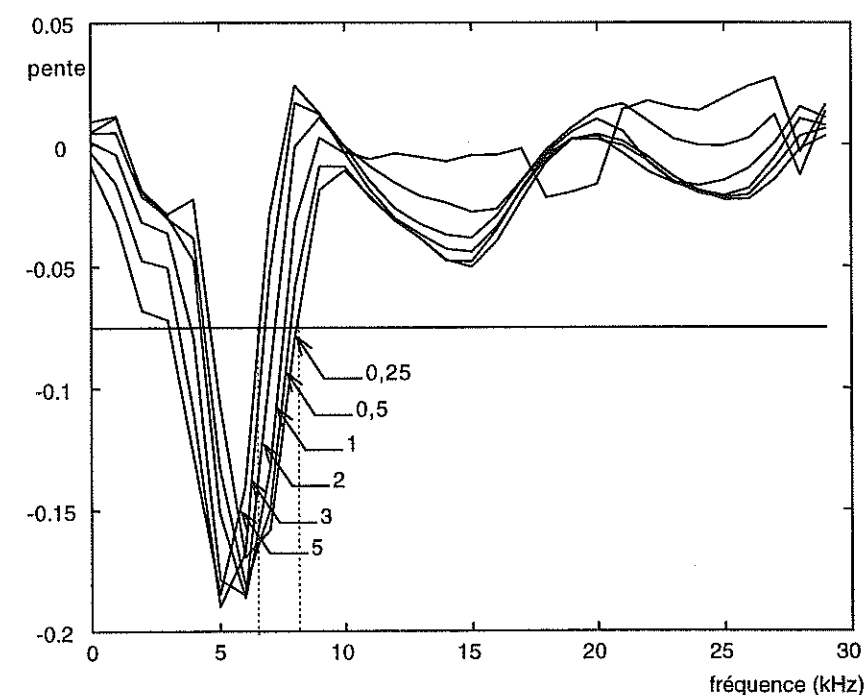


Figure 4.9 : Courbes de pente des rapports de spectres de la Figure 4.8. Le numéro de chaque courbe indique l'épaisseur de la fissure en cm

Pour expliquer ce phénomène, il faut rappeler que les signaux utilisés pour les rapports de spectres sont les signaux complets. Ils contiennent donc l'énergie diffractée par la fissure. Quand la fissure est très fine, l'extrémité de la fissure agit comme un point diffractant pour les ondes incidentes. Quand la fissure a une épaisseur qui n'est plus négligeable, on a deux points de diffraction séparés du fait de la forme rectangulaire de la fissure. Comme chaque diffraction est à l'origine de perte d'énergie, la transmission d'énergie est dans ce cas moins efficace. Ce phénomène est particulièrement sensible pour les fréquences proches de la fréquence de coupure puisque ce sont celles qui interagissent avec l'extrémité de la fissure. L'énergie ainsi diffractée vient s'ajouter à l'énergie transmise sous la fissure. La courbe de rapport de

spectre est modifiée. La lecture de la fréquence de coupure est donc perturbée par ce phénomène.

On trouve ainsi des fréquences de coupure comprises entre 6,5 à 8,1 kHz pour les fissures d'épaisseur variable (Cf. Figure 4.9). La courbe de λ_c en fonction de l'épaisseur est présentée Figure 4.10. L'épaisseur de la fissure est un paramètre qui peut perturber les mesures de profondeur. On peut cependant noter que l'ordre de grandeur des écarts d'épaisseur obtenus pour les fissures homothétiques est petit ($< 0,5$ cm), l'influence de ces variations reste limitée.

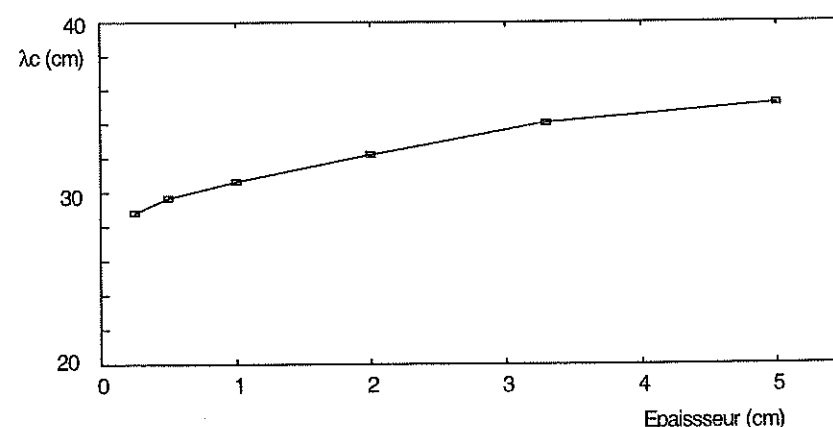


Figure 4.10 : Longueur d'onde de coupure λ_c en fonction de l'épaisseur de la fissure pour des fissures de 10 cm de profondeur.

Au niveau expérimental, les fissures que nous avons fabriquées ont une épaisseur constante de 0,5 cm pour trois profondeurs : 4, 9 et 16 cm. Pour analyser l'influence de cette épaisseur fixe, plusieurs calculs ont été réalisés modélisant des fissures de différentes profondeurs mais avec une épaisseur fixe de 0,5 cm. La mesure de la fréquence de coupure a été effectuée comme précédemment pour établir sa relation avec la profondeur.

La Figure 4.11 montre les modèles numériques utilisés pour l'étude des fissures de 4 et 16 cm de profondeur. On peut noter que pour des raisons numériques, la largeur L des modèles est proportionnelle à la profondeur h de la fissure telle que $L \propto 2h$. Théoriquement les différences de largeur n'ont pas d'influence sur le contenu spectral de l'onde incidente et transmise. Cela modifie seulement la zone de

localisation des capteurs se qui se traduit par des différences dans la forme des fluctuations des courbes de rapport de spectre. Ces fluctuations sont minimisés par le moyennage et le lissage.

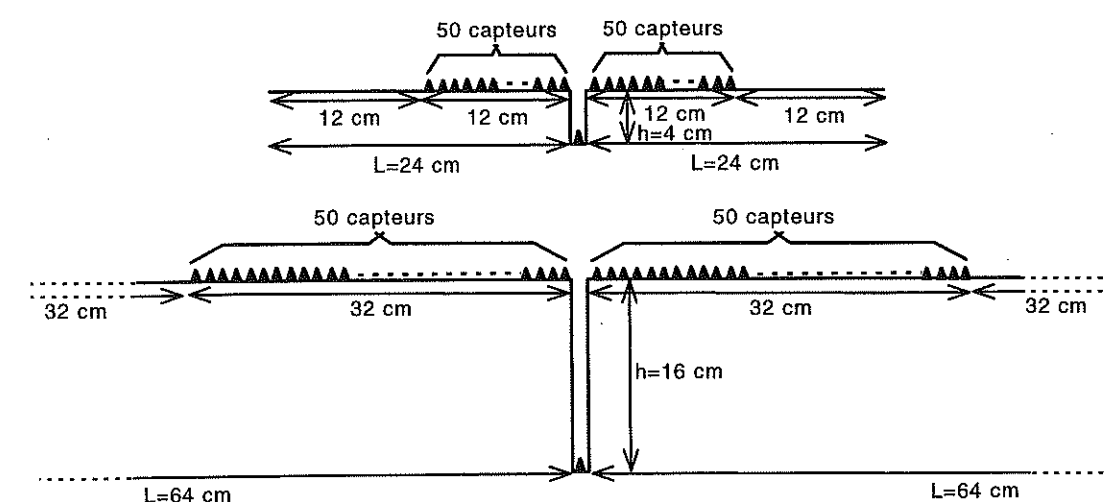


Figure 4.11 : Schémas des modèles numériques utilisés pour l'étude des fissures de 4 et 16 cm. Ces deux modèles ainsi que celui de la fissure de 9 cm (Cf. Figure 4.4), correspondent aux fissures expérimentales construites sur la dalle d'essai.

Les courbes moyennes de rapport de spectres pour des fissures de 2 à 18 cm de profondeur sont présentées Figure 4.12. On constate que pour les fissures dont la profondeur est supérieure à 9 cm, la chute du rapport de spectre intervient à des fréquences légèrement supérieures à celles des fissures homothétiques. Inversement pour les fissures plus petites, la coupure a lieu à plus basse fréquence. Cela correspond bien à l'influence des variations d'épaisseur sur les courbes de rapports de spectres. Ce paramètre n'est pas négligeable pour les courbes de rapports de spectres.

Pour déterminer la fréquence de coupure des différentes courbes de la Figure 4.12, on calcule les pentes. On constate que le critère de -0,075 permet d'établir f_c pour chaque courbe (Cf. Figure 4.13). Les courbes de la profondeur en fonction de la fréquence de coupure f_c et de la longueur d'onde λ_c sont comparées à celles obtenues précédemment (Cf. Figure 4.14). On remarque qu'elles sont légèrement différentes des courbes initialement établies. On obtient une relation entre la longueur d'onde λ_c et la profondeur qui n'est plus linéaire.

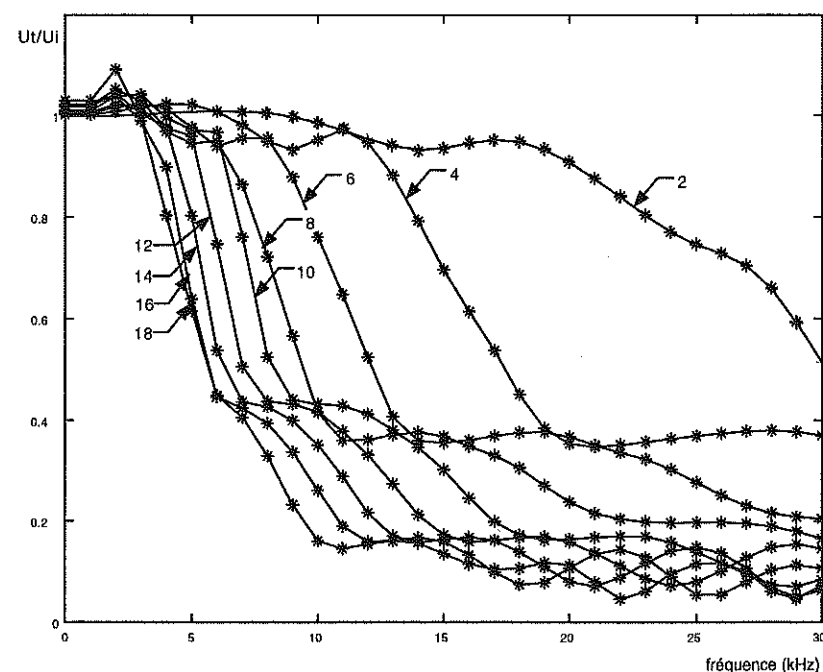


Figure 4.12: Rapport de spectres calculés à partir de données numériques, pour des modèles de fissures d'épaisseur constante de 0,5 cm. Le numéro de chaque courbe indique la profondeur de la fissure en cm.

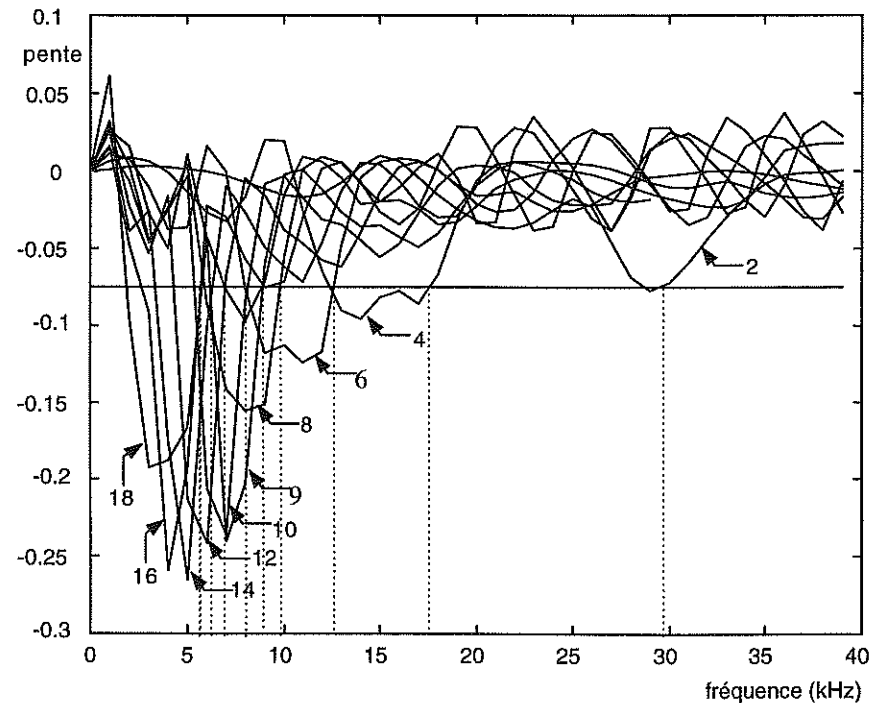


Figure 4.13 : courbes de pente des rapports de spectres pour des fissures de différentes profondeurs. Le numéro de chaque courbe indique la profondeur en cm. Les traits en pointillé indique la localisation de la fréquence de coupure.

Pour l'expérimentation, nous avons besoin d'une relation simple entre λ_c et la profondeur. Etant donné la faible courbure de $h(\lambda_c)$ pour la gamme de profondeur allant de 2 à 16 cm, nous avons choisi d'approximer cette courbe par une droite sur cet intervalle. Cette approximation n'a pas de sens physique, elle permet seulement d'obtenir facilement une évaluation de h à partir de λ_c en prenant en compte l'influence de l'épaisseur des fissures. L'équation de cette droite établie par régression linéaire est :

$$h(\text{cm}) = \frac{\lambda_c(\text{cm})}{2,46} - 1,4 \quad (\text{Eq. 4.5})$$

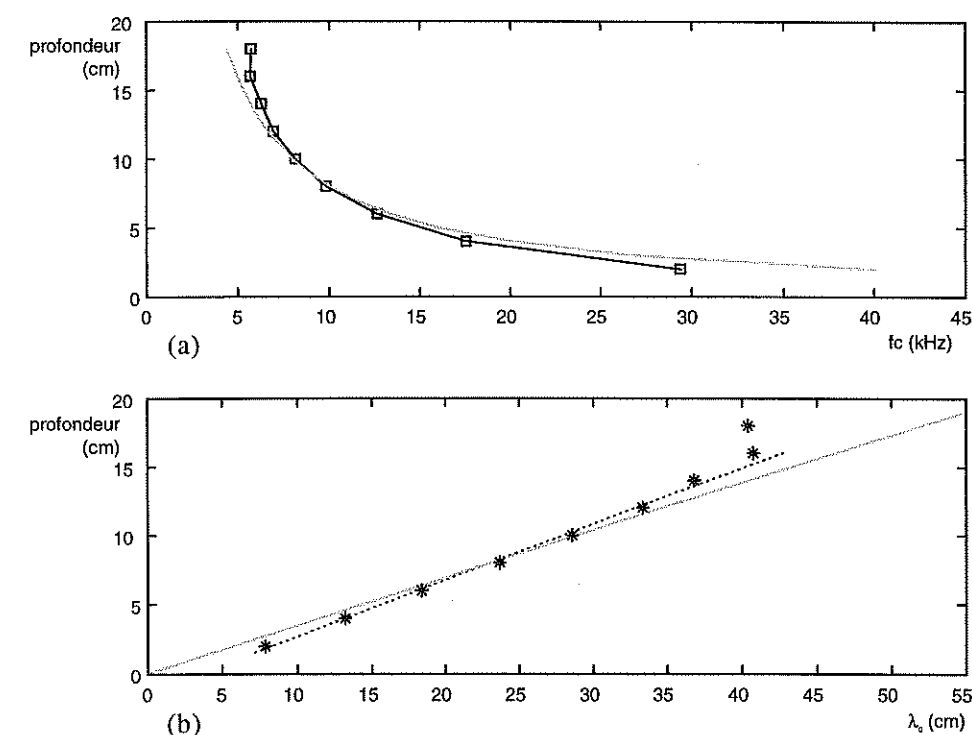


Figure 4.14 : Profondeur de la fissure en fonction de la fréquence de coupure f_c (a) et profondeur de la fissure en fonction de la longueur d'onde correspondante λ_c (b) pour des fissures de 0,5 cm d'épaisseur. Les courbes en gris correspond au cas idéal sans influence de l'épaisseur de la fissure. Pour des raisons numériques, f_c et λ_c dans le cas de la fissure de 18 cm sont aberrants, cette valeur de λ_c n'est pas prise en compte pour la régression linéaire.

La fréquence de coupure pour la fissure de 18 cm de profondeur est légèrement plus haute que prévue. L'explication de ce phénomène est à rechercher dans la

différence de largeur du modèle numérique. Dans le cas des petites fissures, la largeur L du modèle est supérieure ou égale à $4h$ ($L=8h$ pour la fissure de 2 cm, $L=6h$ pour les fissures de 4 à 8 cm, $L=4h$ pour les fissures de 10 à 16 cm). Dans le modèle de la fissure de 18 cm, L a été fixée à $2h$ de chaque côté de la fissure. Cette petite taille du modèle par rapport à la profondeur introduit une imprécision importante sur la détermination de f_c . Cette observation pose la question de la limite numérique de la largeur du modèle par rapport à la profondeur de la fissure. Cette question n'a pas été traitée en détail dans ce travail. La valeur de f_c a été conservée afin de souligner l'importance de ce genre de problèmes pour l'utilisation de la modélisation numérique. Elle n'a pas été prise en compte pour établir la relation entre la profondeur et la fréquence de coupure.

4.3 APPLICATION AUX DONNEES EXPERIMENTALES.

4.3.1 Traitements spécifiques.

Pour pouvoir comparer les résultats expérimentaux et numériques, certains traitements s'avèrent indispensables. Dans le cas de signaux réels, la réponse des capteurs est différente d'un capteur à l'autre et le signal source n'est pas idéal ni parfaitement répétitif. Nous avons ainsi utilisé une procédure classique en traitement du signal géophysique, qui permet de minimiser les effets de source et l'influence de la réponse des capteurs.

Si A_{ij} est l'amplitude spectrale du signal émis par la source i et enregistré au capteur j , on peut écrire son expression en fonction de la réponse U_{ij} du milieu en j pour une source localisée en i :

$$A_{ij} = S_i \cdot U_{ij} \cdot R_j \quad (\text{Eq. 4.6})$$

avec S_i , fonction de la source située en i et R_j , réponse du capteur situé en j .

Suivant notre procédure expérimentale chaque essai est réalisé dans un sens puis dans le sens opposé par rapport à la fissure. Selon l'équation 4.6 et en se reportant à la Figure 4.15, on peut écrire :

$$A_{11} = S_1 \cdot U_{11} \cdot R_1 \quad (\text{Eq. 4.7})$$

$$A_{12} = S_1 \cdot U_{12} \cdot R_2 \quad (\text{Eq. 4.8})$$

$$A_{21} = S_2 \cdot U_{21} \cdot R_1 \quad (\text{Eq. 4.9})$$

$$A_{22} = S_2 \cdot U_{22} \cdot R_2 \quad (\text{Eq. 4.10})$$

Nous pouvons ainsi calculer le rapport :

$$\frac{A_{12}}{A_{11}} \times \frac{A_{21}}{A_{22}} = \frac{S_1 \cdot U_{12} \cdot R_2}{S_1 \cdot U_{11} \cdot R_1} \times \frac{S_2 \cdot U_{21} \cdot R_1}{S_2 \cdot U_{22} \cdot R_2} = \frac{U_{12}}{U_{11}} \times \frac{U_{21}}{U_{22}} \quad (\text{Eq. 4.11})$$

Etant donné la géométrie du problème et en identifiant le trajet commun suivi par les ondes, on peut écrire :

$$\frac{U_{12}}{U_{11}} = \frac{U_{21}}{U_{22}} \quad (\text{Eq. 4.12})$$

d'où

$$\frac{A_{12}}{A_{11}} \times \frac{A_{21}}{A_{22}} = \left(\frac{U_{12}}{U_{11}} \right)^2 \quad (\text{Eq. 4.13})$$

et donc

$$\frac{U_{12}}{U_{11}} = \sqrt{\frac{A_{12}}{A_{11}} \times \frac{A_{21}}{A_{22}}} \quad (\text{Eq. 4.14})$$

Nous nous rapprochons ainsi des conditions idéales des signaux numériques en éliminant les fonctions de la source et des capteurs pour le calcul du rapport de spectre.

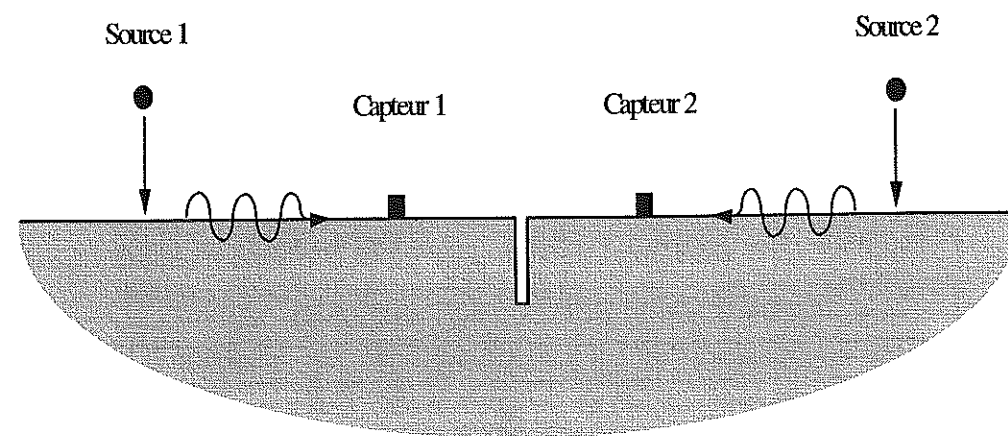


Figure 4.15 : Schéma du principe de l'inversion de la localisation de la source utilisée dans la procédure expérimentale.

4.3.2 Rapports spectraux et fréquences de coupure.

Ce traitement a été d'abord appliqué à des données enregistrées sur la fissure de 9 cm de profondeur. Le dispositif expérimental est décrit sur la Figure 4.16.

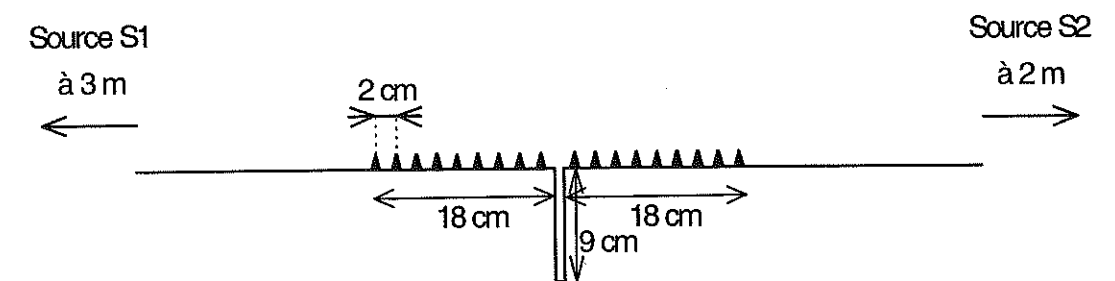


Figure 4.16 : Schéma du dispositif expérimental utilisé pour l'auscultation de la fissure de 9 cm. Ce dispositif comprend 18 capteurs espacés de 2 cm les uns des autres et disposés symétriquement par rapport à la fissure. Les sources S1 et S2 sont localisées sur les bords de la dalle.

La moyenne est calculée à partir de 9 courbes de rapports spectraux. La distance intercapteurs est de 20,5 cm pour chaque couple. Pour limiter l'influence du bruit et des réflexions tardives sur les bords de la dalle, les signaux sont multipliés par une fenêtre de Hanning de 700 μ s centrée sur le maximum d'amplitude du signal. Cette fenêtre est ensuite prolongée par des 0 jusqu'à 2048 points pour obtenir un pas d'échantillonnage en fréquence de 0,488 kHz. Les signaux sont filtrés par un filtre passe-bas dont la bande d'arrêt (atténuation de 20 dB) commence à 30 kHz. Comme précédemment pour les courbes numériques, la courbe moyenne est légèrement lissée par une moyenne glissante de 4 points de large (soit environ 2 kHz) pour minimiser les effets des petites oscillations de la courbe. La courbe obtenue est présentée Figure 4.17.

Cette courbe est comparée à celle obtenue par modélisation numérique dans des conditions de géométries similaires (Cf. Figure 4.18). La partie grisée sur la gauche des Figures 4.17 à 4.19 (de 0 à 4 kHz) correspond aux longueurs d'ondes supérieures à l'épaisseur de la dalle. Elles sont influencées par le milieu sous-jacent et ne peuvent pas être prises en compte dans l'hypothèse d'un milieu infini. Pour les fréquences supérieures, on constate un bon ajustement de ces deux courbes. La fréquence de

coupure établie pour la courbe expérimentale selon le critère présenté précédemment est de $8,377 \pm 0,8$ kHz (Cf. Figure 4.19). L'incertitude est évaluée par l'écart maximum à la courbe moyenne des courbes de rapport de spectres. Selon l'équation 4.5 et en utilisant la valeur de vitesse trouvée expérimentalement ($V_R = 2400 \pm 220$ m/s, Cf. Chap. 3, § 3.1.2.b), on estime la profondeur à $9,7 \pm 1,9$ cm.

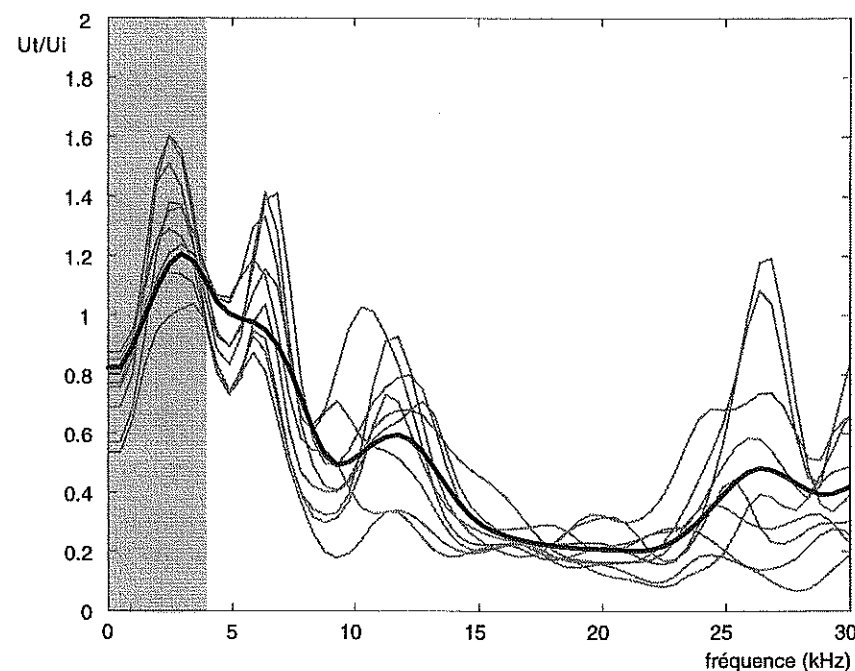


Figure 4.17 : Courbe moyenne (en noir) des rapports de spectres de l'onde transmise sur l'onde incidente calculée à partir de données expérimentales pour une fissure de 9 cm de profondeur et 0,5 cm d'épaisseur. La zone grisée sur la gauche correspond aux longueurs d'ondes supérieures à l'épaisseur de la dalle.

Ce même traitement a été appliqué à des données enregistrées sur les fissures de 4 et 16 cm avec des dispositifs similaires (Cf. Figure 4.20). Dans le cas de la fissure de 16 cm, on obtient des résultats qui confirment ceux de la fissure de 9 cm (Cf. Figures 4.21 et 4.22). Les courbes de rapport de spectres expérimentales et numériques sont bien ajustées et on établit la fréquence de coupure expérimentale à $5,668 \pm 0,5$ kHz. L'incertitude est évaluée par le calcul de l'écart maximum à la courbe moyenne des courbes de rapport de spectres. A l'aide de l'équation 4.5, on estime la profondeur de la fissure à $16,0 \pm 3,4$ cm.

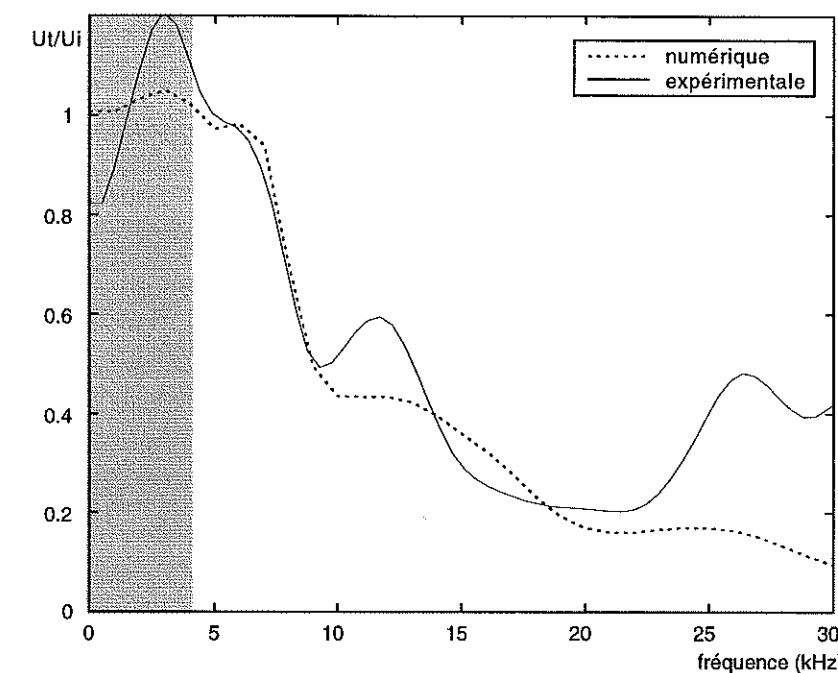


Figure 4.18 : Comparaison des courbes de rapports de spectres établies à partir de données numériques et expérimentales pour une fissure de 9 cm de profondeur.

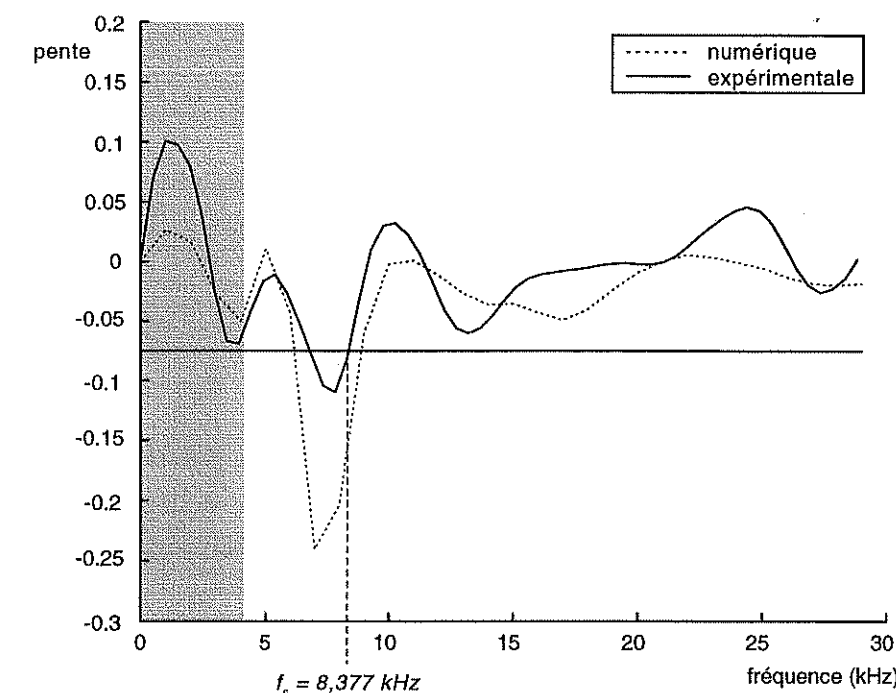


Figure 4.19 : Détermination de la fréquence de coupure expérimentale par la localisation du point où la pente du rapport de spectre redevient supérieure à -0,075 pour une fissure de 9 cm.

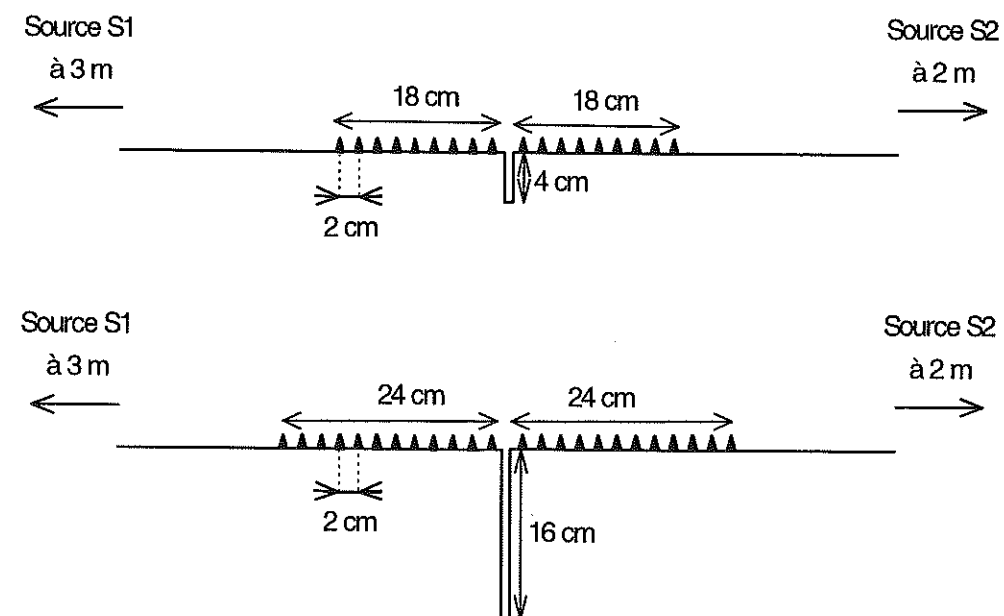


Figure 4.20 : Schémas des dispositifs expérimentaux utilisés pour l'auscultation des fissures de 4 et 16 cm.

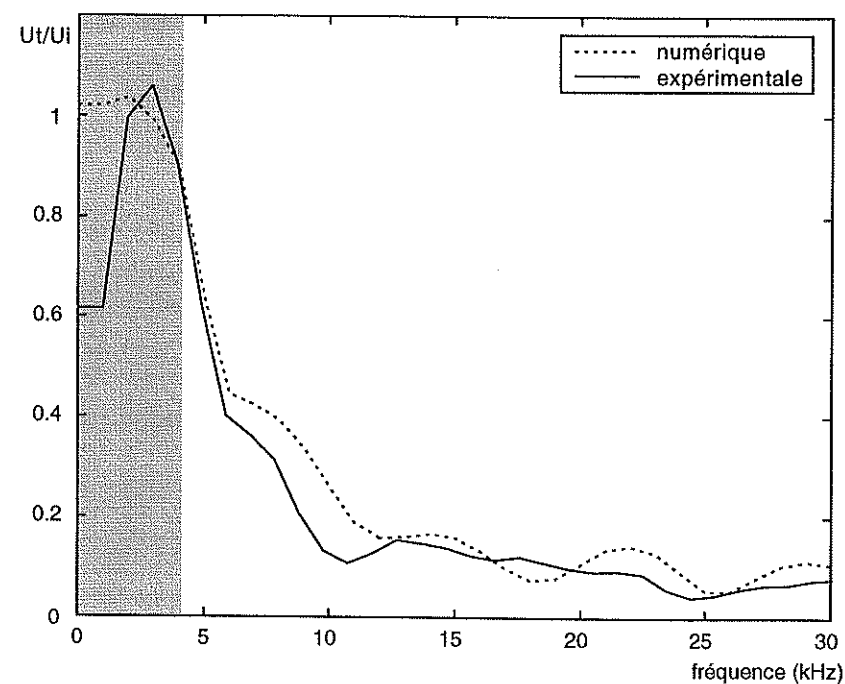


Figure 4.21 : Comparaison des courbes de rapports de spectres établies à partir de données numériques et expérimentales pour une fissure de 16 cm de profondeur.

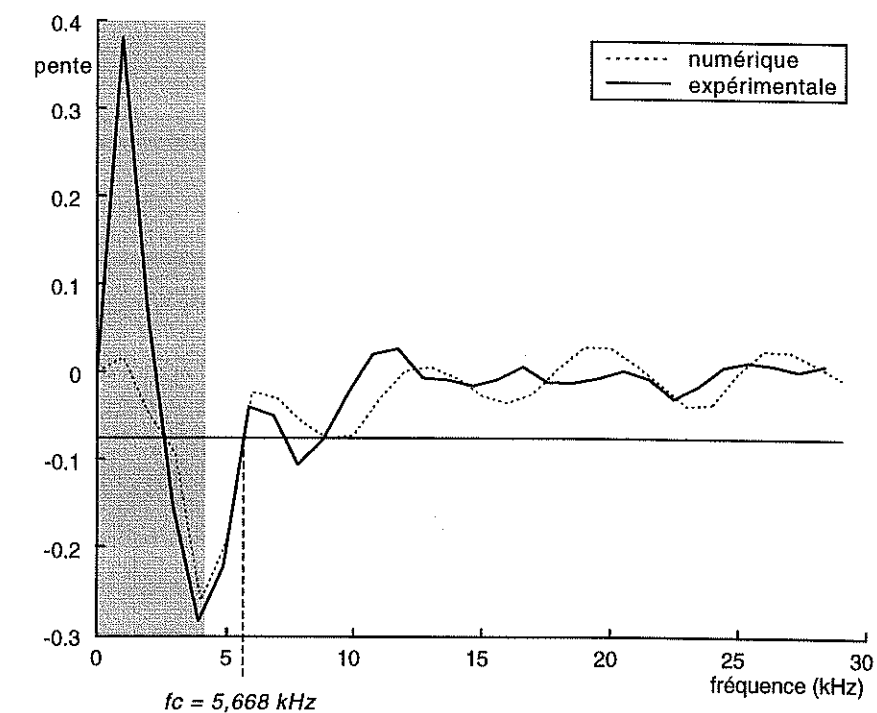


Figure 4.22 : Détermination de la fréquence de coupure expérimentale par la localisation du point où la pente du rapport de spectre redevient supérieure à -0,075 pour une fissure de 16 cm.

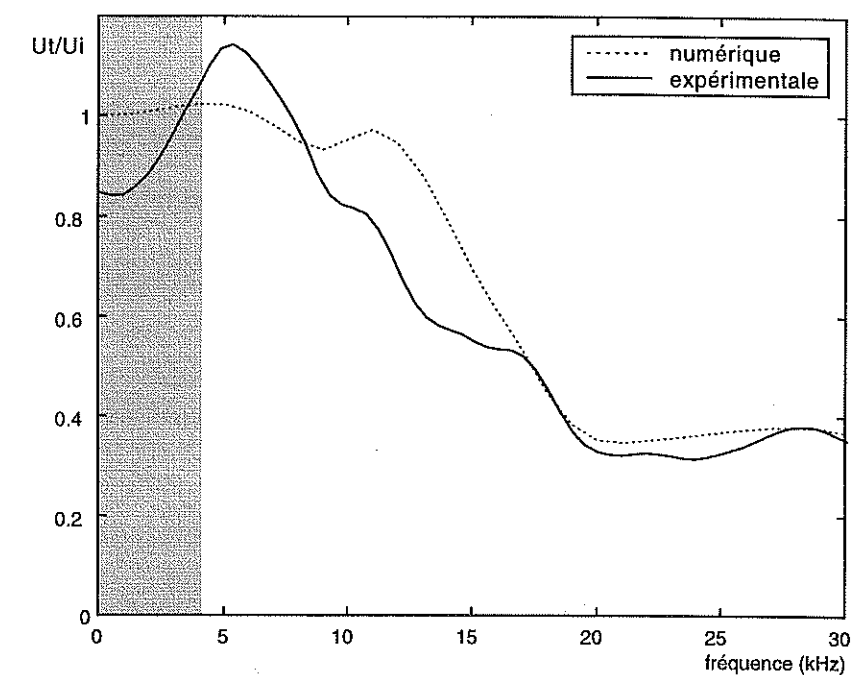


Figure 4.23 : Comparaison des courbes de rapports de spectres établies à partir de données numériques et expérimentales pour une fissure de 4 cm de profondeur.

Dans le cas de la fissure de 4 cm, les mêmes traitements ont été effectués. On obtient cependant une courbe de rapport spectral expérimentale qui ne s'ajuste pas très bien avec la courbe numérique calculée pour des conditions similaires (Cf. Figure 4.23). La courbe indique bien une chute d'énergie et cette chute semble prendre fin pour des fréquences proches de celles de la courbe numérique. Cela laisse supposer que le phénomène de filtrage a bien lieu. Néanmoins des oscillations importantes de la courbe expérimentale avant la chute rendent très délicate une interprétation de cette courbe. Sur la courbe de pente, ces oscillations masquent le pic attendu dans la zone de coupure (Cf. Figure 4.24), elles empêchent la détermination de la fréquence f_c .

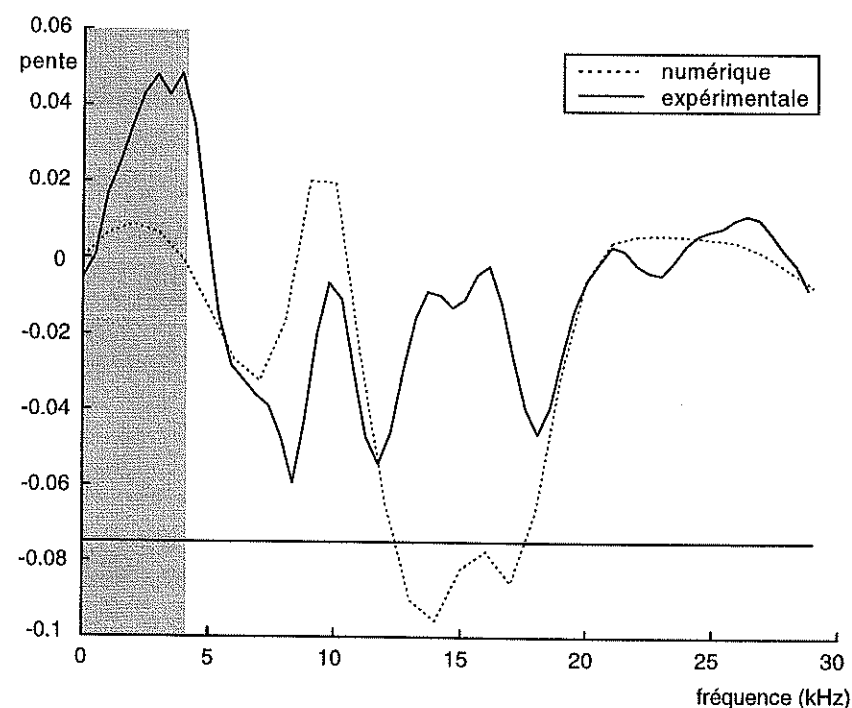


Figure 4.24 : Pente du rapport de spectres pour une détermination de la fréquence de coupure pour une fissure de 4 cm. Cette détermination est délicate pour les données expérimentales à cause des oscillations importantes de la courbe de rapport spectral.

Des calculs identiques effectués avec d'autres jeux de données enregistrées sur cette fissure avec différentes configurations de capteurs confirment ce résultat. Il semble que la précision des informations fournies par cette méthode n'est pas suffisante pour des fréquences supérieures à 15 kHz (soit des longueurs d'ondes

inférieure à 16 cm). Cela peut être dû à l'amortissement de ces ondes par diffraction sur les hétérogénéités du béton. Cette diffraction est en effet plus importante pour les ondes de hautes fréquences étant donné la taille des hétérogénéités. On obtiendrait alors trop peu d'énergie pour mettre en évidence l'influence de la fissure sur la propagation de l'onde. Dans le modèle numérique, le milieu est infini et homogène, le phénomène de filtrage de l'onde de Rayleigh par la fissure peut être observé pour toutes les échelles. Expérimentalement, l'hétérogénéité du béton peut être une limite pour l'auscultation des fissures dont la profondeur est inférieure à 5 cm environ. On peut également envisager un problème de précision des capteurs pour ces fréquences. En effet, les caractéristiques théoriques fournies par le fabricant précisent la gamme de fréquences dans laquelle le capteur répond, néanmoins ces caractéristiques sont établies dans des conditions précises de laboratoire. La réponse des capteurs dans nos conditions d'utilisation n'a pas pu être vérifiée expérimentalement.

4.4 COMPARAISON AVEC LA METHODE TEMPORELLE D'AUSCULTATION SONIQUE.

4.4.1 Rappel du principe de la méthode.

La méthode temporelle d'auscultation sonique est une méthode classique qui a de nombreux domaines d'applications (Cf. Chap.1, § 1.3.4.b). Dans le cadre du génie civil, cette méthode est relativement bien connue mais elle est assez peu employée, essentiellement parce qu'elle s'avère délicate à utiliser.

Le principe de la méthode repose sur la diffraction des ondes P par la fissure de surface. Il consiste à mesurer le temps d'arrivée t d'une onde P émise en surface et enregistrée à une distance x (Cf. Figure 4.25). Si aucune fissure n'intervient entre l'émission et la réception, la relation entre t et x est :

$$t = \frac{x}{V_P} \quad (\text{Eq. 4.15})$$

où V_P est la vitesse de l'onde P dans le matériau considéré.

Si, par contre, il existe une fissure entre l'émetteur et le récepteur, on obtient une relation du type :

$$t = \frac{1}{V_p} \left(\sqrt{x_1^2 + h^2} + \sqrt{x_2^2 + h^2} \right) \quad (\text{Eq. 4.16})$$

où x_1 est la distance de l'émetteur à la fissure,
 x_2 est la distance de la fissure au récepteur,
 et h , la profondeur de la fissure.

Ainsi, en traçant la courbe $t(x)$, on observe une discontinuité au niveau de la fissure dont l'amplitude dépend uniquement de h .

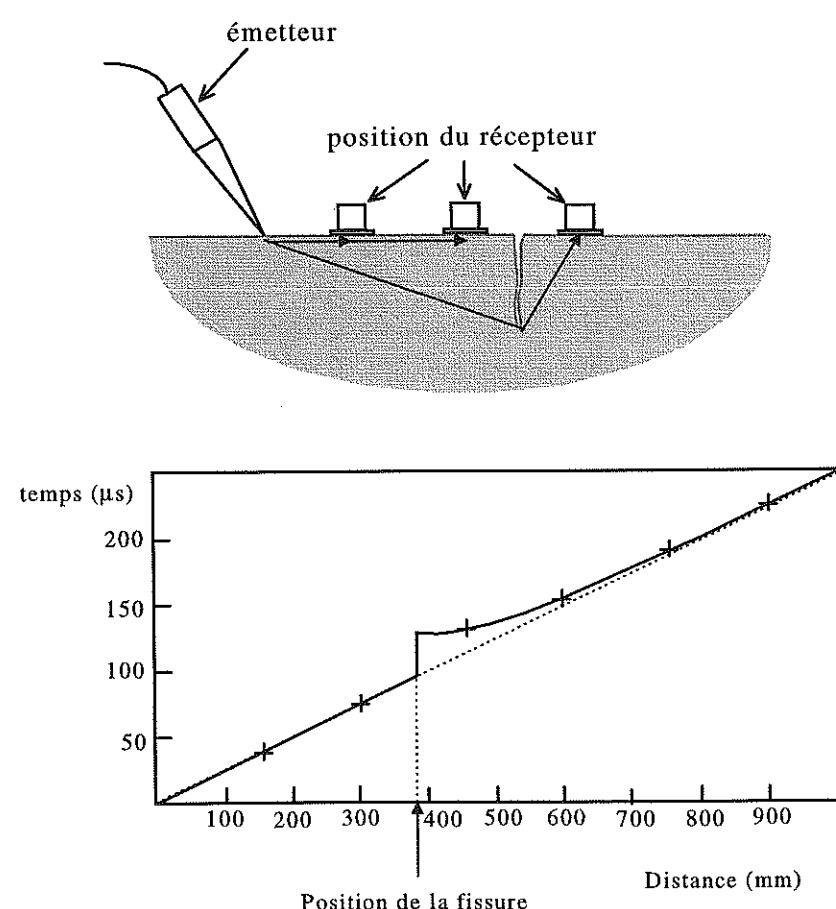


Figure 4.25 : Principe de détermination de la profondeur d'une fissure de surface par la méthode temporelle d'auscultation sonore. (d'après le *British Standard*¹)

¹ British Standard, 1986. *Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete*, Testing concrete, BS 1881 : Part 203 : 1986.

4.4.2 Premiers tests et traitement des données.

Pour nos expérimentations, nous avons utilisé l'appareil d'auscultation sonore développé au sein du réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées pour l'auscultation des ouvrages d'art. On peut noter que cet appareil est conforme aux préconisations du British Standard. Cet outil comprend un émetteur constitué d'une cellule piézo-électrique qui émet un pulse de fréquence centrale 50 kHz et un récepteur adapté. La source et le capteur sont tenus à la main. Ils sont reliés à un boîtier qui fournit l'énergie et peut mesurer de façon automatique le temps d'arrivée de l'onde P. La mesure se fait dès qu'un seuil d'amplitude pré-réglé est dépassé.

Les premiers essais que nous avons effectués en suivant les indications d'utilisation classique, nous ont permis de mettre en évidence l'importance du rôle d'une fissure de surface sur la propagation de l'onde P. Si on peut suivre aisément la progression de l'onde avant la fissure en mesurant ses temps d'arrivée en différents points, l'atténuation devient forte après la fissure. Nous n'avons d'ailleurs pas pu obtenir de mesure de la profondeur de pénétration des fissures. L'amplitude du signal que l'on cherche à identifier est inférieure au niveau de bruit. Non seulement, le système de pointé automatique est mis en défaut mais le pointé manuel est également rendu très difficile avec ce dispositif.

Après de nombreuses tentatives, il s'est avéré que pour faire des mesures de profondeur de fissures dans le béton, un dispositif plus lourd est indispensable. Nous avons donc choisi d'enregistrer un grand nombre de signaux dans le but de pouvoir les traiter de façon plus complète a posteriori.

Nous avons ainsi utilisé le système d'acquisition décrit au chapitre 3 (§ 3.1.1.a) avec l'émetteur de l'appareil d'auscultation sonore. Plusieurs capteurs ont été collés sur la surface de la dalle de part et d'autre de la fissure. L'émetteur est fixe pendant la durée de l'enregistrement. Un grand nombre de signaux est ainsi enregistré pour un dispositif particulier. L'essai est ensuite renouvelé pour la même disposition de capteurs mais dans le sens inverse, l'émetteur étant placé symétriquement à sa position initiale par rapport à la fissure. Cela permet de disposer de deux jeux de mesures pour l'auscultation de la même fissure, au même endroit.

Les signaux obtenus sont sommés pour améliorer le rapport signal sur bruit. Ce traitement permet de pointer avec précision les temps d'arrivée de l'onde P diffractée par la fissure. On trace alors les points dans un diagramme temps-distance pour observer la discontinuité de la courbe $t(x)$ au niveau de la fissure. En fonction de la vitesse de propagation des ondes P dans le milieu, on peut évaluer la profondeur de la fissure par comparaison avec des abaques calculés pour différentes profondeurs.

4.4.3 Application aux fissures artificielles de la dalle n°2.

Dans le but de comparer la validité de cette méthode par rapport à la méthode en onde de surface, nous l'avons testée sur les mêmes fissures artificielles de 4, 9 et 16 cm. Pour vérifier la fiabilité de la méthode, on compare les pointés avec la courbe théorique calculée avec les équations 4.15 et 4.16 avec la vitesse des ondes P mesurée préalablement dans la dalle (Cf. Chap. 3, § 3.1.2.b). En observant les courbes des temps d'arrivées en fonction de la distance, on constate que les points expérimentaux sont relativement bien ajustés aux courbes théoriques (Cf. Figure 4.26).

On peut estimer la précision du pointé à $\pm 3 \mu s$ et tracer les barres d'incertitude sur les courbes (Cf. Figure 4.27). On note que cette incertitude est absolue, elle est plus importante pour les petites fissures que pour les grandes. Par exemple pour détecter une fissure de 1 cm de profondeur il faudrait pouvoir détecter des écarts de temps inférieurs à $1 \mu s$. Comme on peut le constater, la fissure de 4 cm est tout juste détectable. Par contre plus la fissure est profonde, plus les écarts de temps à détecter sont grands. Pour les fissures de 9 et 16 cm de profondeur, l'incertitude de $\pm 3 \mu s$ donne une précision de l'ordre de 1 cm.

On peut également remarquer que le calcul de la profondeur de fissure fait intervenir la vitesse. Dans le cas de la dalle d'essais, cette vitesse a été établie avec un grand dispositif (jusqu'à 4,5 m) avant l'introduction des fissures. On a ainsi obtenu une précision de l'ordre de 4% sur la mesure (Cf. Chap. 3, § 3.1.2.b). Dans un cas réel d'auscultation de fissures de surface (notamment avec l'appareil d'auscultation sonique), un tel dispositif n'est pas envisageable parce que la puissance de l'appareil n'est pas suffisante pour des longueurs supérieures à 1 ou 2 m.

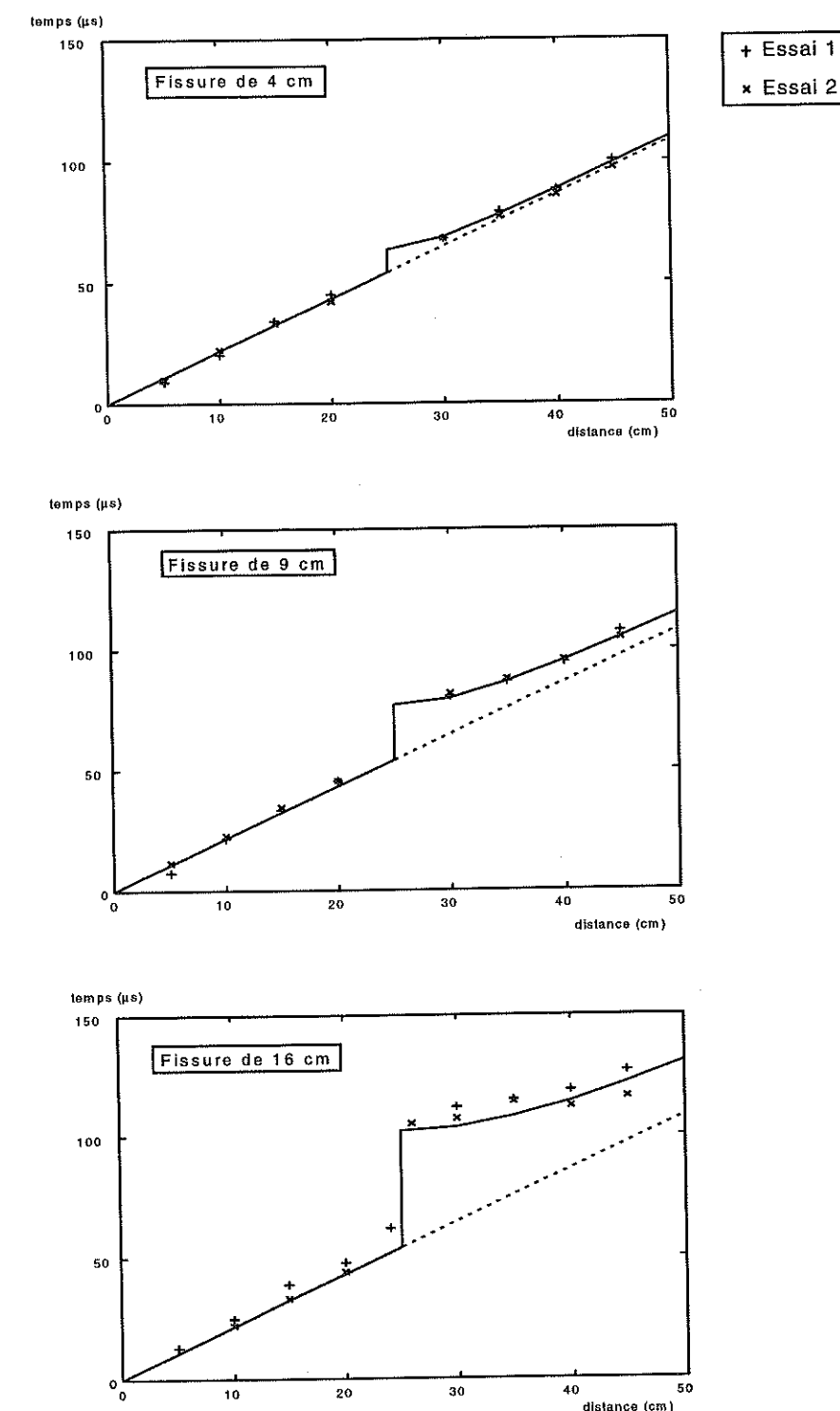


Figure 4.26 : Comparaison des mesures temporelles d'auscultation sonique avec les courbes théoriques pour des fissures artificielles de 4, 9 et 16 cm. Dans chaque cas, deux essais ont été réalisés dans les deux sens opposés. La vitesse des ondes P utilisée pour les courbes théoriques est de 4630 m/s.

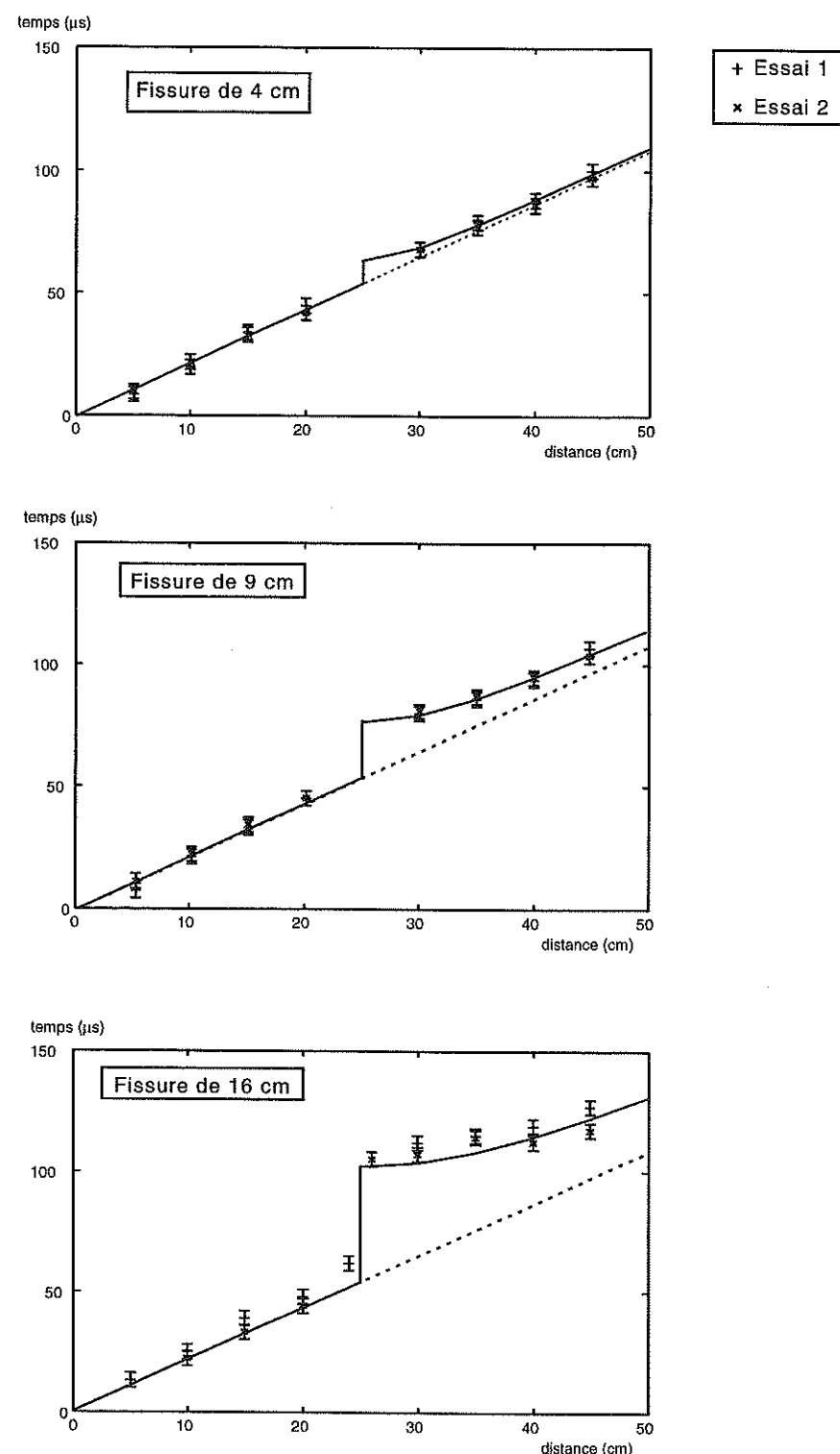


Figure 4.27 : Idem Figure 4.26 avec le tracé des barres d'incertitude sur les pointés temporels de $\pm 3 \mu s$.

Les préconisations classiques de l'appareil d'auscultation sonore suggèrent d'utiliser les signaux enregistrés avant la fissure pour évaluer la vitesse. Il faut bien remarquer qu'étant donné la longueur de ce dispositif (de l'ordre de 20 cm), la précision de la localisation des capteurs ($\pm 0,5$ cm) et la précision du pointé ($\pm 3 \mu s$), on obtient une incertitude sur la vitesse de l'ordre de 9%. Cette incertitude augmente de façon sensible l'imprécision sur la mesure de la profondeur des fissures.

4.5 CONCLUSION.

L'analyse spectrale des signaux enregistrés sur une fissure a permis de mettre en évidence l'influence de la présence d'une fissure de surface sur la propagation d'une onde de Rayleigh. Pour résumer, la fissure joue le rôle d'un filtre passe-bas en transmission, c'est à dire que seules les ondes de basse fréquence sont directement transmises au-delà de la fissure. La fréquence limite au-delà de laquelle les ondes ne sont plus transmises ne dépend que de la profondeur de la fissure. Par analogie aux filtres, cette fréquence est appelée fréquence de coupure.

Ces observations nous ont permis de proposer une méthode d'évaluation de la profondeur de fissure de surface par la mesure de cette fréquence de coupure. Cette méthode a été établie et mise au point à partir de la modélisation numérique. Elle a ensuite été testée expérimentalement sur des fissures artificielles avec des traitements adaptés et en prenant en compte l'influence de l'épaisseur de la fissure.

Les résultats expérimentaux et les résultats numériques sont relativement bien ajustés. Le phénomène de filtrage des ondes de Rayleigh par la fissure de surface est donc vérifié expérimentalement dans le béton.

Nous avons ainsi pu évaluer la profondeur de fissure de 9 et 16 cm avec une précision de l'ordre de 15 à 20%. Dans le cas de la fissure de 4 cm de profondeur, la mesure s'est avérée plus délicate. En effet, des fluctuations importantes de la courbe de rapport de spectres dans la zone de coupure empêchent la mesure de la fréquence. Cela est peut être dû à la diffraction plus importante pour les ondes de hautes fréquences étant donné la taille des hétérogénéités du béton. Cela masquerait le

phénomène de filtrage par la fissure et ne permettrait pas la mesure de la fréquence de coupure. La qualité de la réponse des capteurs pour ces fréquences (> 15 kHz) peut également être mise en question. On obtient cependant de bons résultats pour les fissures de plus grandes profondeurs.

Dans le but de vérifier la validité de cette méthode spectrale par rapport à la méthode temporelle d'auscultation sonore plus classique, des essais ont été réalisés sur les fissures artificielles. Il s'avère que, pour obtenir des résultats fiables, la méthode temporelle nécessite un dispositif expérimental plus lourd que celui préconisé. Ce dispositif mis en oeuvre, la méthode donne de bons résultats pour les fissures de 9 et 16 cm avec une précision de l'ordre du centimètre. Cependant pour la fissure de 4 cm, la précision de cette méthode n'est pas suffisante. En effet, les écarts de temps à mesurer pour détecter cette fissure sont du même ordre de grandeur que les incertitudes.

Nous disposons donc de deux méthodes d'évaluation de la profondeur de pénétration des fissures de surface. Ces deux méthodes, très différentes dans leur principe, fournissent des résultats assez similaires dans le cas des fissures artificielles : une bonne fiabilité pour des fissures de profondeur supérieure à 5 cm.

On peut noter que, pour un bon fonctionnement, ces deux méthodes nécessitent un dispositif quasiment identique. On peut les utiliser simultanément pour un faible surcoût de mise en oeuvre expérimental. Cela permet de fiabiliser le résultat sur l'évaluation de la profondeur. Nous préconisons donc l'utilisation de ces deux méthodes dans le cas général pour l'auscultation et l'évaluation de la profondeur de pénétration des fissures de surface. Elles ont ainsi été appliquées pour l'auscultation de cas particuliers de fissures artificielles et dans un cas de fissuration réelle (Cf. Chap. 5 et 6).

Chapitre 5

Application à des cas particuliers de fissuration artificielle

Chapitre 5

Applications à des cas particuliers de fissuration artificielle

Afin de caractériser l'intérêt de la méthode spectrale d'auscultation, nous avons souhaité évaluer ses possibilités pour des cas particuliers de fissurations. Ces cas ont été choisis parce qu'ils correspondent à des problèmes concrets, ils permettent d'étudier les limites des méthodes d'auscultation. Nous avons ainsi réalisé des essais sur les fissures artificielles en présence d'eau et en présence de contacts dans la fissure. Ce second cas a notamment été l'occasion d'établir et de comprendre la figure de diffraction d'une onde de Rayleigh sur ce type de géométrie.

5.1 FISSURES REMPLIES D'EAU.

5.1.1 Pourquoi étudier le cas des fissures remplies d'eau ?

La présence d'eau dans la fissure est une des conditions qui rend théoriquement inefficace la méthode temporelle d'auscultation sonique. En effet le principe de cette méthode utilise la propagation des ondes P. Une fissure de surface ouverte agit comme un écran et empêche la propagation de ces ondes en surface. C'est ce phénomène associé à la diffraction de l'onde P sur l'extrémité de la fissure qui permet d'évaluer la profondeur de celle-ci. Dans le cas où la fissure est remplie (ou partiellement remplie) d'eau, la propagation de l'onde P est théoriquement possible dans la fissure puisque les ondes de compression se propagent dans les fluides. Cette onde directe pourrait masquer l'arrivée de l'onde diffractée par l'extrémité de la fissure. De plus, l'énergie diffractée serait beaucoup plus faible que dans le cas d'une fissure sèche, la différence d'impédance entre le béton et l'eau étant inférieure à la différence d'impédance béton-air. La fissure pourrait devenir indétectable par la méthode d'auscultation temporelle.

Le principe de la méthode spectrale repose, de son côté, sur l'utilisation des ondes de Rayleigh. Ces ondes ont une composante cisailante importante par rapport à leur composante de compression or les ondes de cisaillement ne se propagent pas dans les fluides (le module de cisaillement d'un fluide est nul). La propagation d'une onde de Rayleigh devrait donc être perturbée par la présence de la fissure même remplie d'eau.

Le problème des fissures remplies d'eau est un problème concret puisque les structures en béton sont en général soumises à des conditions climatiques variées. L'humidité est souvent présente dans les fissures sans que l'on puisse facilement l'éliminer. Dans ce cas, l'auscultation sonique des fissures peut être remise en cause. Disposer d'une méthode qui permettrait de confirmer (ou d'infirmar) les résultats de l'auscultation des fissures par la méthode temporelle est donc particulièrement intéressant. Nous avons ainsi réalisé une série d'essais sur les fissures artificielles avec les deux méthodes d'auscultation en présence d'eau.

5.1.2 Auscultation par la méthode spectrale.

Nous avons utilisé, pour cette auscultation, un dispositif expérimental plus large que précédemment (Cf. Figure 5.1), installé sur la dalle n°2. Du fait de la largeur de la dalle, nous avons pu disposer nos capteurs jusqu'à 1,20 m de la fissure de part et d'autre, avec une distance intercapteurs de 10 cm. Les sources sont situées aux extrémités de la dalle.

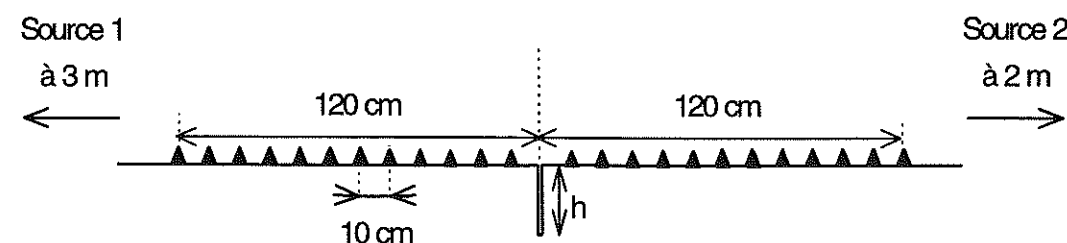


Figure 5.1 : Dispositif expérimental utilisé pour la méthode spectrale sur les fissures artificielles de 9 et 16 cm de profondeur ($h=9$ cm ou $h=16$ cm) en présence d'eau.

L'auscultation a été réalisée tout d'abord sur la fissure de 16 cm. L'expérience est décomposée en deux étapes. La première consiste à ausculter la fissure parfaitement sèche. Pour la seconde, les bords de la fissure sont obstrués et la fissure remplie d'eau jusqu'à la surface. Les signaux obtenus sont traités dans les deux cas selon la procédure décrite au chapitre 4 (§ 4.3.1). Les rapports de spectres sont calculés pour douze couples de capteurs avec une distance de 130,5 cm entre deux capteurs d'un même couple (Cf. Figure 5.2).

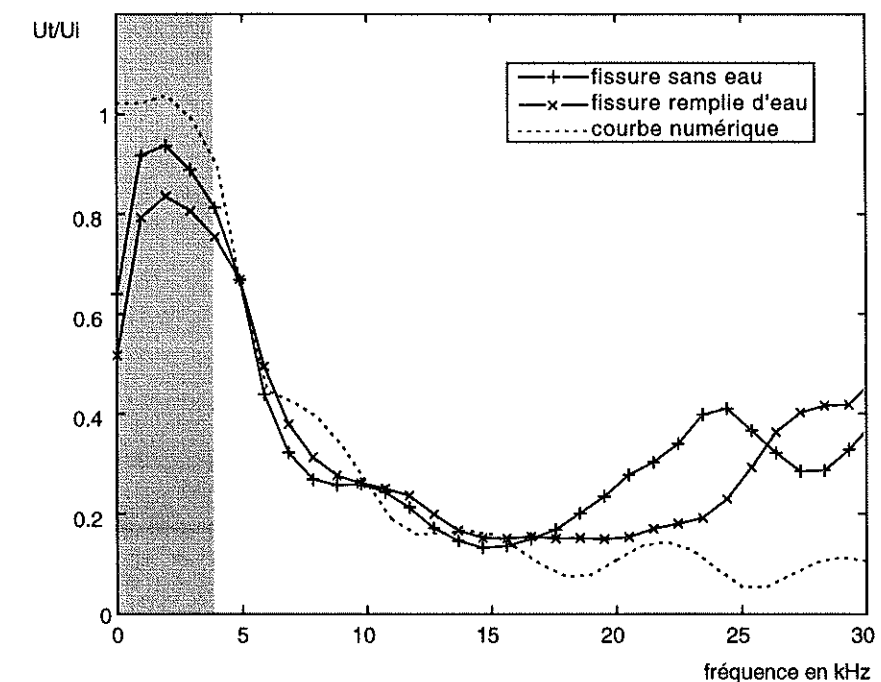


Figure 5.2 : Courbes de rapport de spectres obtenues sur la fissure de 16 cm sèche et remplie d'eau. La courbe en pointillés est la courbe numérique obtenue pour une fissure de 16 cm (sans eau).

On constate, en observant ces courbes, que le rapport de spectre est peu modifié. Le phénomène de filtrage est clairement mis en évidence dans les deux cas. La fréquence de coupure est mesurée à $6,6 \pm 0,7$ kHz (Cf. Figure 5.3). Selon l'équation 4.5, on estime la profondeur de la fissure à $13,4 \pm 2,7$ cm.

Il apparaît donc que les ondes de Rayleigh ne sont pas transmises à travers la fissure remplie d'eau. L'influence de la fissure sur la propagation des ondes de Rayleigh est la même que la fissure soit sèche ou remplie d'eau.

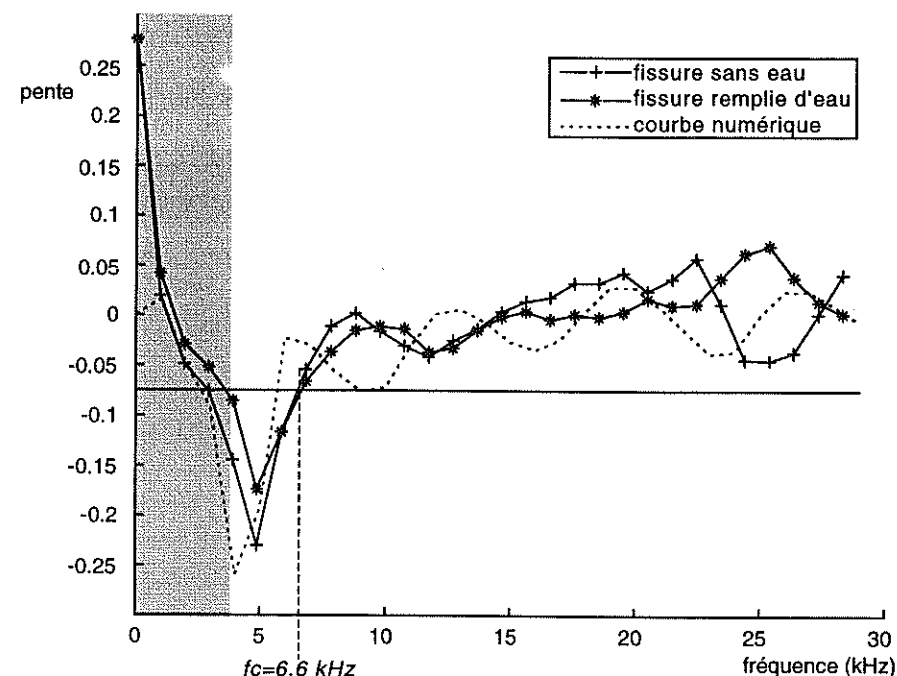
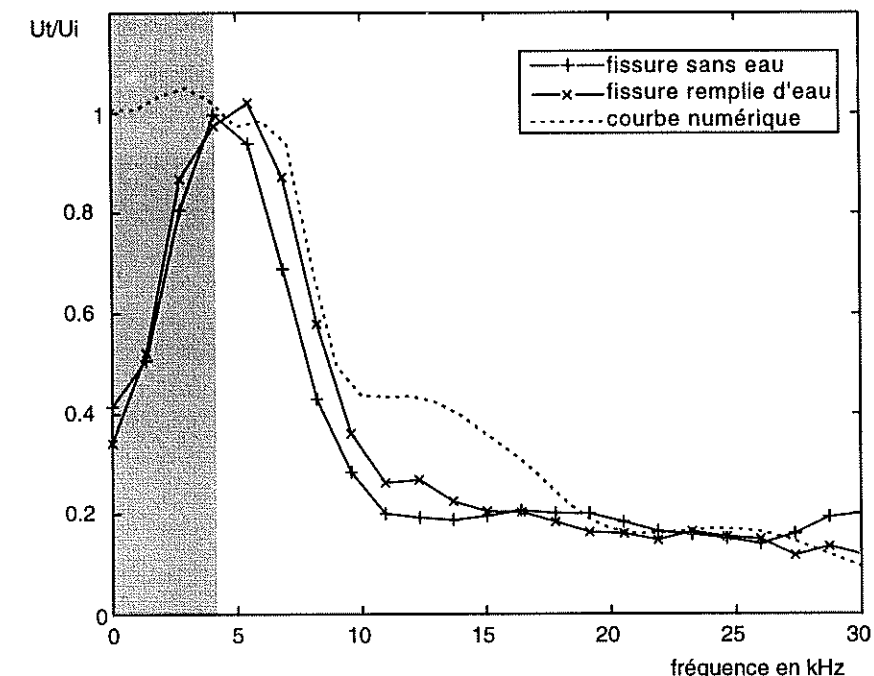


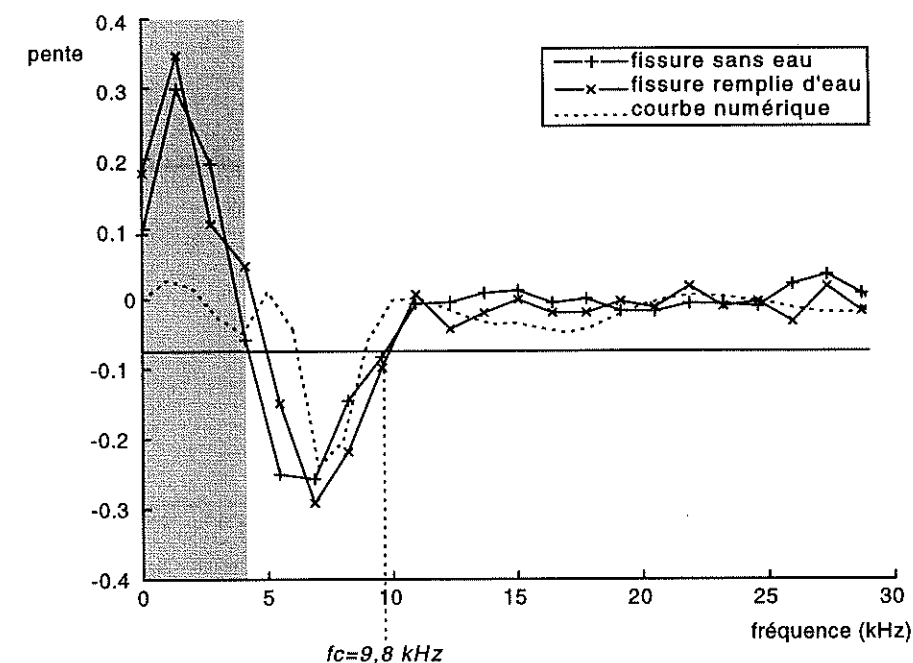
Figure 5.3 : Pentas des courbes de rapport de spectre de la Figure 5.2 et détermination de la fréquence de coupure.

Les essais réalisés sur la fissure de 9 cm confirment ce résultat (Cf. Figure 5.4). La fréquence de coupure mesurée pour la fissure sèche ou remplie d'eau est de $9,8 \pm 0,8$ kHz soit une profondeur évaluée à $8,6 \pm 1,5$ cm. L'utilisation de cette méthode est donc envisageable en présence d'eau dans la fissure. L'expérience n'a pas été réalisée sur la fissure de 4 cm étant donné les difficultés rencontrées pour d'auscultation de cette profondeur (Cf. Chap 4, §4.3.2).

Les courbes théoriques présentées en pointillé sur les Figures 5.2 à 5.4, ont été obtenues à partir de modélisation numérique pour une fissure de 16 et 9 cm. Le dispositif de ces modèles est plus petit que le dispositif expérimental (Cf. Figure 5.5 pour la fissure de 16 cm). On pourra remarquer la relativement bonne adéquation entre les courbes numériques et expérimentales malgré cette différence. Seules des fluctuations perturbent un peu cet ajustement. L'importance de ces fluctuations est liée aux interférences qui peuvent se produire entre les différents trains d'ondes des signaux (Cf. Chap. 4, §§4.2 et 4.3). C'est à ce niveau qu'intervient la position des capteurs. Ce point n'a pas été étudié en détail dans ce travail. C'est une piste intéressante dans la perspective de recherches ultérieures.



(a)



(b)

Figure 5.4 : Courbes de rapport de spectres (a) et les pentes correspondantes (b) obtenues sur la fissure de 9 cm avec et sans eau. Les courbes en pointillé sont les courbes numériques obtenues pour une fissure sèche de 9 cm de profondeur.

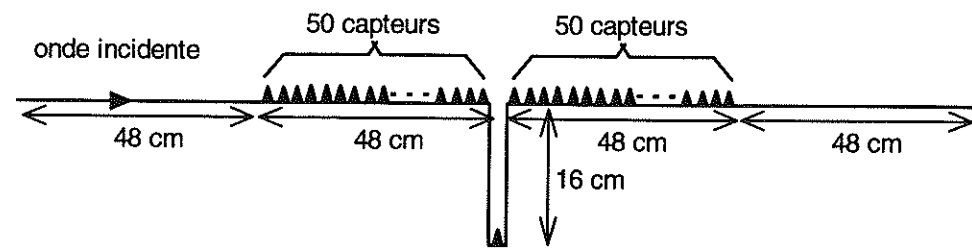


Figure 5.5 : Exemple de dispositif du modèle numérique utilisé pour le calcul des courbes théoriques (cas de la fissure de 16 cm).

5.1.3 Auscultation par la méthode temporelle.

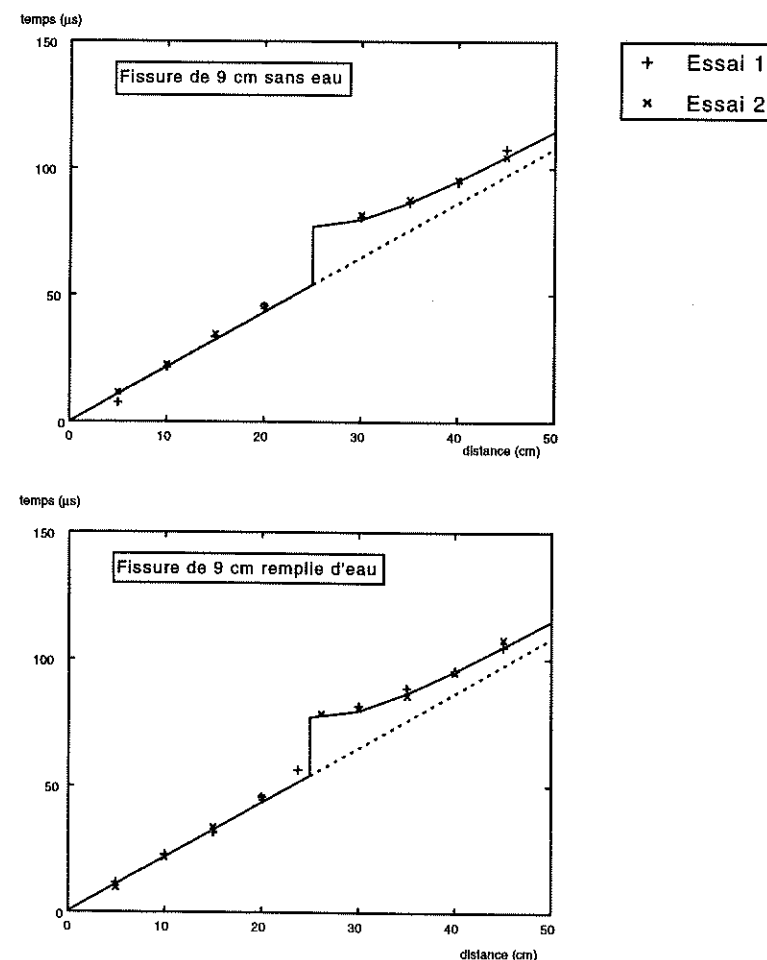


Figure 5.6 : Mesures temporelles d'auscultation sonique avec et sans eau pour la fissure de 9 cm. Les courbes en noir sont les courbes théoriques calculées pour cette profondeur avec une vitesse de 4630 m/s.

La méthode temporelle a également été testée sur les fissures remplies d'eau avec le dispositif décrit au chapitre 4 (§ 4.4.1). Les résultats pour les fissures de 9 et 16 cm sont présentés Figure 5.6 et Figure 5.7. L'étude de la fissure de 4 cm en présence d'eau a été écartée puisqu'on ne peut pas obtenir de mesures suffisamment fiables par la méthode temporelle pour cette profondeur (Cf. Chap. 4, § 4.4.2).

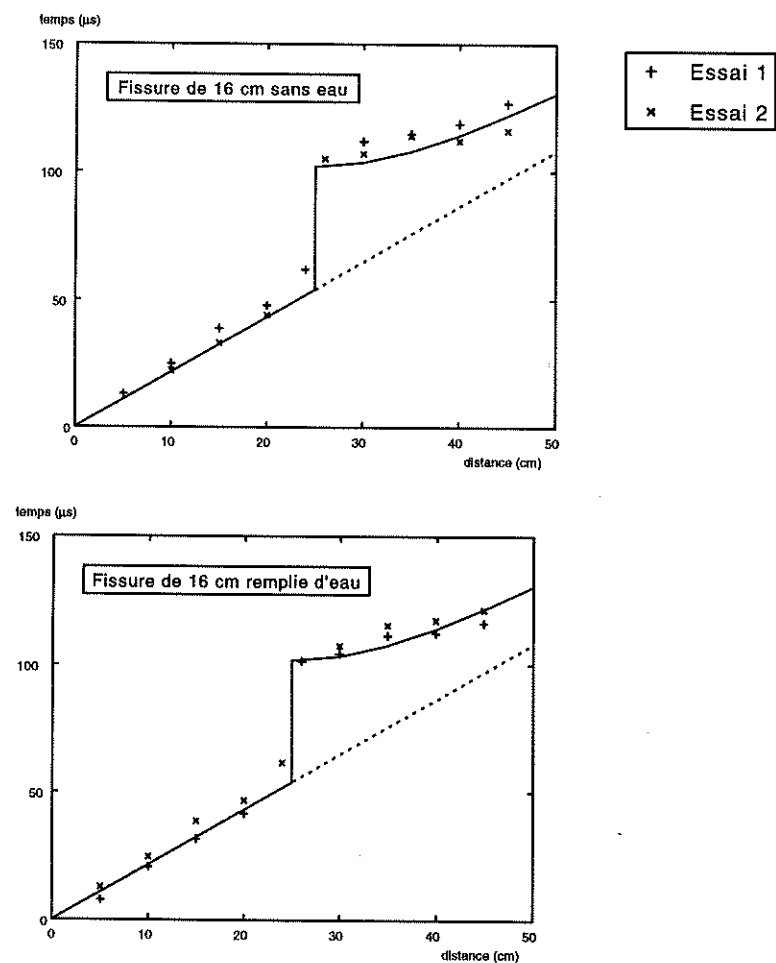


Figure 5.7 : mesures temporelles d'auscultation sonique avec et sans eau pour les fissures de 16 cm. Les courbes en noir sont les courbes théoriques calculées pour cette profondeur avec une vitesse de 4630 m/s.

On constate que les temps d'arrivée des ondes P dans le cas où les fissures sont remplies d'eau, correspondent à ceux enregistrés sur les fissures sèches. Les points s'ajustent sur les courbes théoriques des fissures sans eau dans les deux cas. La profondeur de pénétration de la fissure peut donc être évaluée même en présence d'eau.

5.1.4 Conclusion.

Malgré leur capacité à se propager dans les liquides, l'énergie des ondes P transmise à travers l'eau n'est expérimentalement pas décelable. Pour expliquer ce phénomène, on peut calculer les coefficients de réflexion et de transmission pour une interface béton-eau à partir des impédances de ces matériaux. Soit une interface entre deux milieux, R le coefficient de réflexion et T le coefficient de transmission, leur expression pour une incidence normale est :

$$R = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1} \quad (\text{Eq. 5.1})$$

$$T = \frac{2\rho_2 V_2}{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2} \quad (\text{Eq. 5.2})$$

où ρ_1 et ρ_2 sont respectivement les densités du premier et du second milieu, V_1 et V_2 , les vitesses du premier et du second milieu.

Dans le cas d'une interface béton-eau, on a :

$$\rho_1 = 2500 \text{ kg/m}^3,$$

$$V_1 = 4630 \text{ m/s},$$

$$\rho_2 = 1000 \text{ kg/m}^3 \text{ et}$$

$$V_2 = 1430 \text{ m/s}.$$

On obtient, selon les équations 5.1 et 5.2 :

$$R = -0,8$$

$$T = 0,2$$

On constate que peu d'énergie peut être transmise. La double transition (béton-eau, eau-béton) que représente la fissure rend cette dernière pratiquement opaque aux ondes P quelle que soit son épaisseur. Il est donc difficile d'observer expérimentalement l'énergie transmise à travers une fissure remplie d'eau.

Le problème de l'utilisation de la méthode temporelle dans le cas où les fissures contiennent de l'eau est un problème théorique. Etant donné la différence d'impédance entre l'eau et le béton, on constate que peu d'énergie peut être transmise à travers une fissure remplie d'eau. En pratique, nous n'avons pas observé cette transmission d'énergie. La présence d'eau ne pose donc pas de difficulté pour l'utilisation des méthodes d'auscultation spectrale et temporelle. L'utilisation de ces deux méthodes en parallèle permet de conforter les résultats.

5.2 FISSURES AVEC CONTACTS.

5.2.1 Intérêts de la fissure présentant des contacts.

Jusqu'ici nous avons modélisé des fissures en fonction de la géométrie d'un trait de scie. Nous avons construit des "fissures" artificielles dont nous pouvions contrôler les paramètres géométriques (forme, profondeur, épaisseur,...). La réalité d'une fissure est, bien sûr, plus complexe. Afin de nous en approcher, nous avons étudié le cas où la fissure présente un ou plusieurs contacts entre les deux lèvres à des profondeurs intermédiaires. Une fissure réelle dans le béton est très irrégulière. L'existence de contacts mécaniques entre les deux faces de la fissure est possible. Ces contacts peuvent être ponctuels ou concerner des surfaces plus grandes jusqu'au cas de la fissure refermée.

Dans le cadre de l'auscultation des fissures de surface, l'existence éventuelle de ces contacts est pénalisante pour la méthode temporelle. Elle n'indique que la profondeur du premier contact sans donner d'information sur le prolongement de la fissure en profondeur. Cela permet d'établir un premier diagnostic, mais une information sur le prolongement de la fissure sous le contact est souhaitable pour évaluer plus précisément l'état de fracturation de la structure concernée.

Nous avons choisi d'étudier l'influence de contacts entre les deux bords d'une fissure sur la propagation des ondes de Rayleigh. L'objectif est de déterminer les informations que l'on peut obtenir sur ce type de fissure par la méthode d'analyse spectrale et de voir comment elles complètent celles de la méthode temporelle.

5.2.2 Etude numérique de l'influence des contacts.

5.2.2.a Analyse du phénomène.

Pour étudier le comportement de l'onde de Rayleigh sur une fissure avec un contact nous avons modélisé numériquement une fissure verticale de 10 cm de profondeur et 5 mm d'épaisseur avec un contact de 1 cm de hauteur entre 4,5 à 5,5 cm de profondeur (Cf. Figure 5.8). Ce contact est parfait puisqu'il ne présente aucune discontinuité de matière. La Figure 5.9 montre les sismogrammes synthétiques obtenus pour ce modèle. A titre de comparaison, les sismogrammes obtenus pour un modèle identique mais sans contact sont présentés sur la même figure. Leur différence facilite l'interprétation des trains d'onde.

La présence d'une onde de Rayleigh entre l'onde directement transmise et l'onde transmise "sous" la fissure est mise en évidence. Le décalage temporel par rapport à l'onde directement transmise, correspond au temps de trajet d'une onde de Rayleigh longeant les bords de la fissure et passant par le contact. Le contact agit comme un point diffractant. On observe la même figure de diffraction que pour l'extrémité de la fissure avec la présence d'ondes de volume.

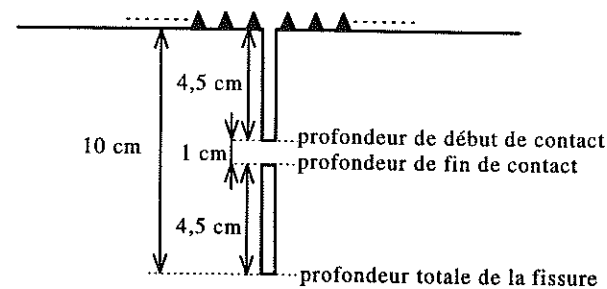


Figure 5.8. : modèle numérique de la fissure avec contact.

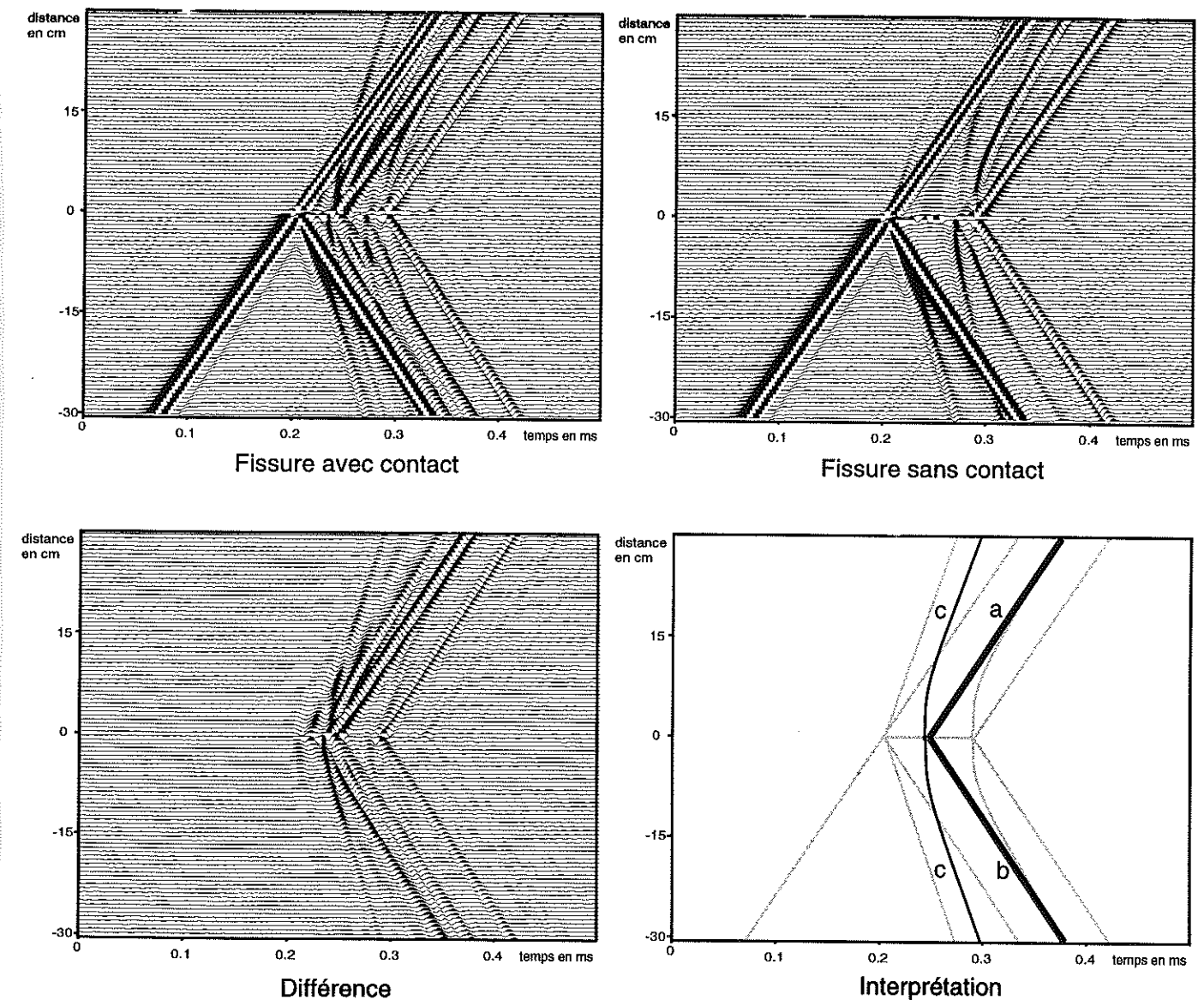


Figure 5.9 : Sismogrammes synthétiques obtenus dans le cas d'une fissure de 10 cm de profondeur avec et sans contact. La différence de ces deux jeux de signaux facilite l'interprétation. Le signal source est une impulsion de Ricker de 80 kHz de fréquence centrale. Sur le schéma d'interprétation les courbes grises correspondent aux trains d'ondes précédemment identifiés (Cf. Chap. 2, Figure 2.5). Les courbes noires correspondent aux trains d'ondes liés à la présence du contact :
a : onde de Rayleigh transmise par le contact,
b : onde de Rayleigh réfléchie sur le contact,
c : ondes de volume diffractées par le contact.

L'interaction de l'onde de Rayleigh avec la fissure est modifiée. On peut considérer cette fissure avec contact comme deux fissures superposées : une de 10 cm de profondeur et l'autre de 4,5 cm. Si l'énergie transmise par le contact est importante par rapport à l'énergie transmise sous la fissure, elle masquera l'influence de la partie profonde, on n'obtiendra qu'une information sur la profondeur du contact. Si cette énergie est faible, on obtiendra une information sur la profondeur totale de la fissure.

5.2.2.b Influence du contact sur les courbes de rapport de spectres.

Pour observer cette influence, nous avons modélisé différents cas de fissures avec contacts. Nous sommes partis d'un modèle de fissure de 10 cm de profondeur et 0,5 cm d'épaisseur. Le contact est caractérisé par sa profondeur de début et de fin (Cf. Figure 5.8). Quatre séries d'essais ont été réalisées pour vérifier l'influence de chaque paramètre.

• Série I

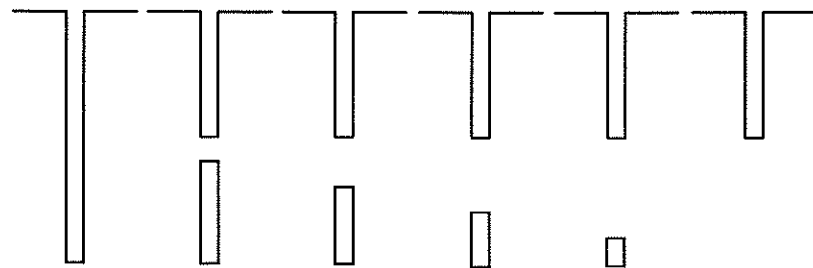


Figure 5.10 : Schéma des modèles utilisés pour étudier l'influence de l'épaisseur d'un contact en profondeur (Série I).

Pour la première série d'essai la profondeur de début de contact est fixée à 5 cm, la profondeur de fin varie de 5 à 10 cm avec un pas de 0,5 cm. On passe donc graduellement d'une fissure simple de 10 cm à une fissure simple de 5 cm en épaississant le contact (Cf. Figure 5.10)

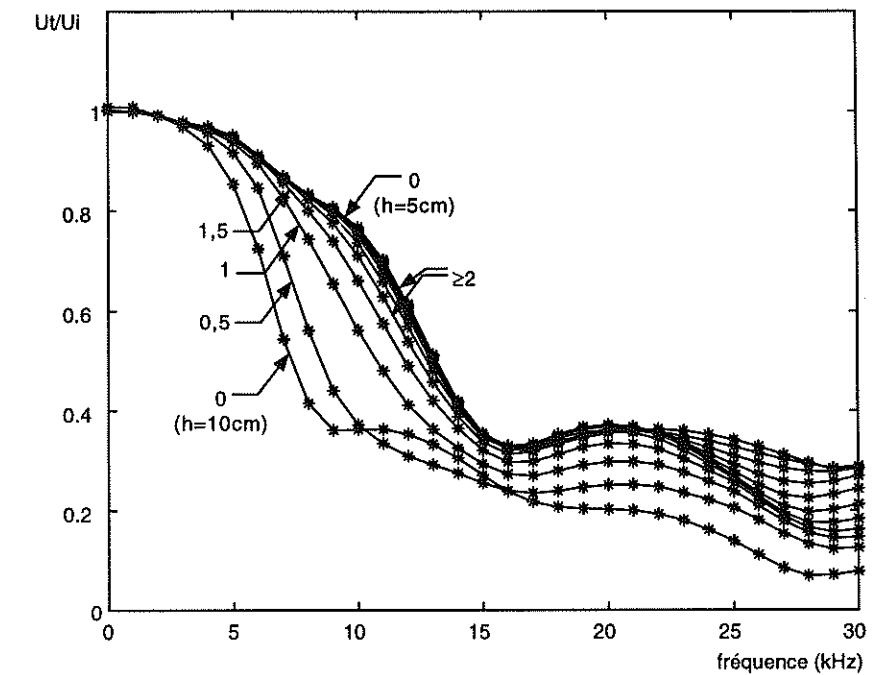


Figure 5.11 : Rapports de spectres calculés pour les modèles de la série I (Cf. Figure 5.10). Le numéro des courbes indique la hauteur du contact en cm.

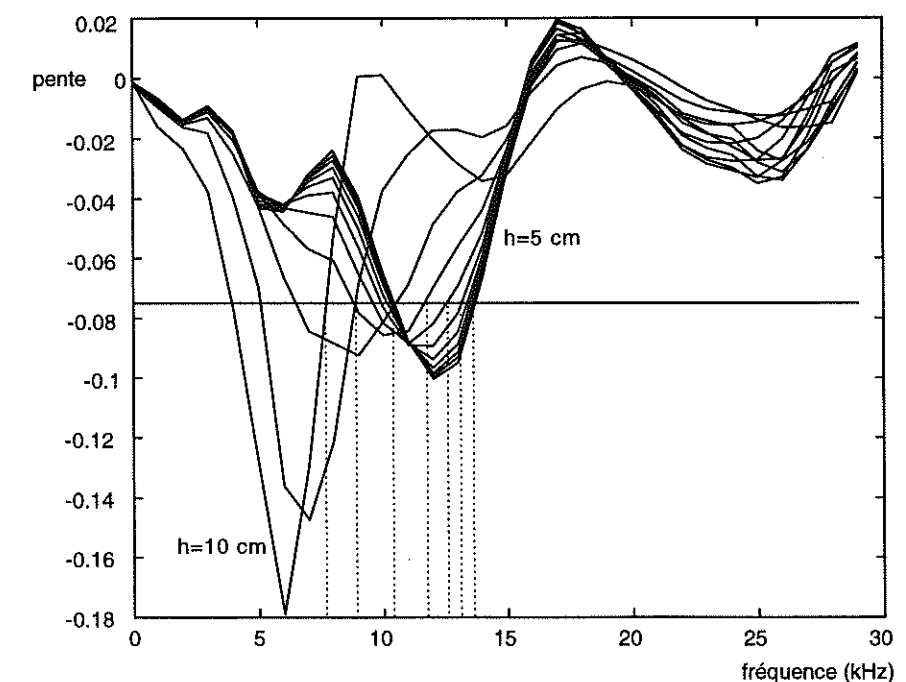


Figure 5.12 : Pentés des courbes de la Figure 5.11 pour la détermination des fréquences de coupure.

Les courbes de rapports de spectres correspondantes (Cf. Figure 5.11) indiquent clairement que pour des contacts dont l'épaisseur est supérieure à 2 cm, on ne peut plus observer l'influence de la partie profonde de la fissure. La courbe de rapport de spectre est équivalente à celle d'une fissure de 5 cm de profondeur. Si par contre le contact reste inférieur à 2 cm, la quantité d'énergie transmise par ce contact ne suffit pas à masquer totalement l'influence de la partie profonde. La profondeur estimée de la fissure sera alors comprise entre 5 et 10 cm (Cf. Figure 5.12).

• Série II

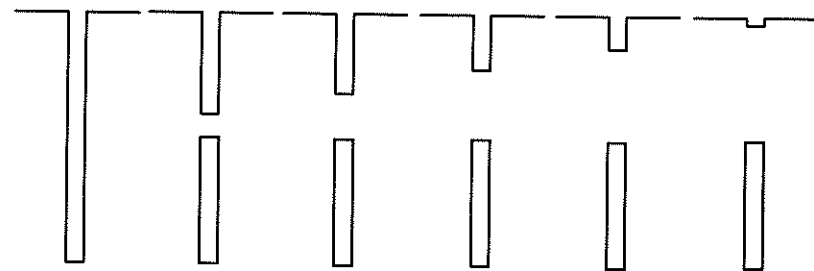


Figure 5.13 : Schéma des modèles utilisés pour étudier l'influence de l'épaisseur d'un contact superficiel (Série II).

Dans la deuxième série d'essais, le contact a une profondeur de fin fixée à 5 cm et une profondeur de début qui varie de 5 à 0,5 cm avec un pas de 0,5 cm. On passe donc graduellement d'une fissure simple de 10 cm à une fissure de 0,5 cm avec une cavité de 5 cm de haut enfouie à 5 cm de profondeur (Cf. Figure 5.13). Là encore, on constate que pour un petit contact, le rapport de spectre est peu modifié. Pour un contact dont la hauteur devient plus importante, l'influence de la partie profonde de la fissure n'est plus visible (Cf. Figure 5.14), toute l'énergie est directement transmise par le contact.

Sur les courbes de pente de ces rapports de spectres (Cf. Figure 5.15), on remarque que pour des contacts de 1 ou 1,5 cm, les valeurs de pente restent supérieures à -0,075 ce qui ne permet pas de déterminer de fréquence de coupure selon notre procédure. Cela signifie que la coupure n'est pas aussi brutale que dans le cas des fissures sans contact. Cette différence dans la pente est faible, elle pourrait peut être permettre d'identifier une fissure avec contact d'une fissure moins profonde sans contact. Cette observation n'a pas été exploitée dans ce travail, notre objectif étant plus axé sur les applications expérimentales.

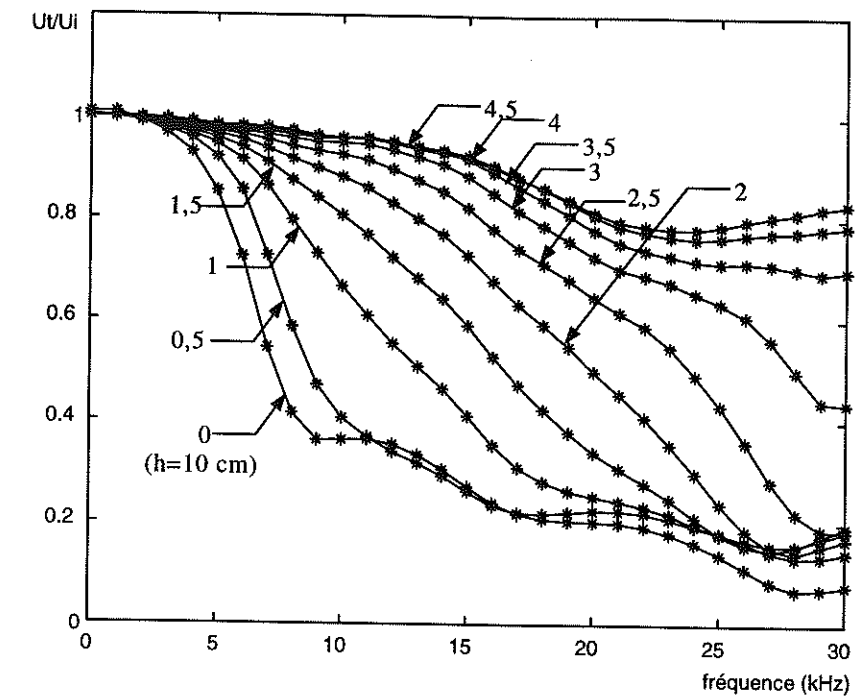


Figure 5.14 : Rapports de spectres calculés pour les modèles de la série II (Cf. Figure 5.13). Le numéro des courbes indique la hauteur du contact en cm.

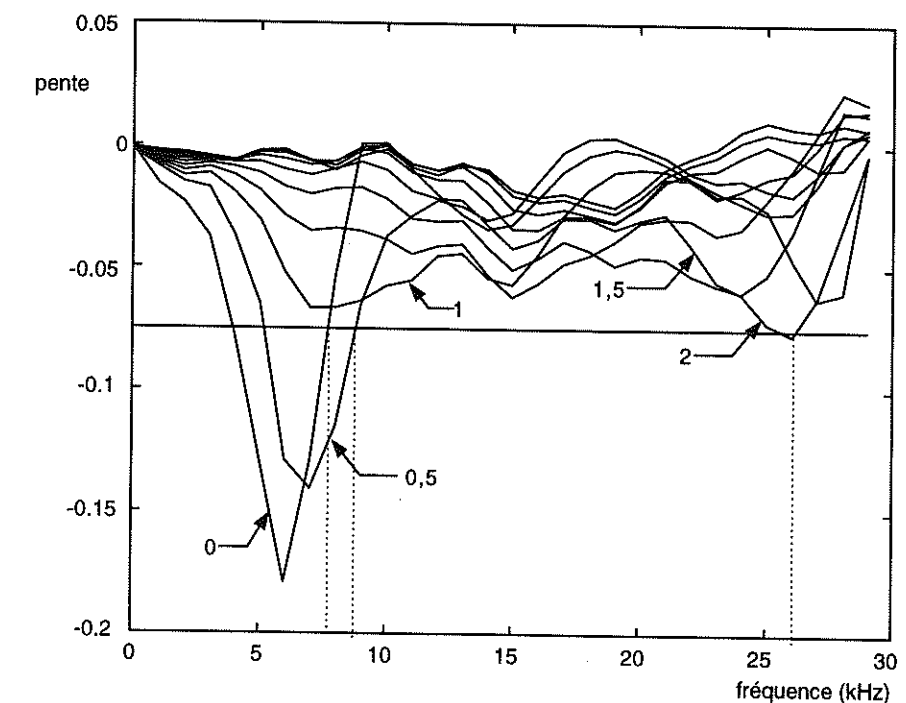


Figure 5.15 : Pentes des courbes de la Figure 5.14. Le numéro des courbes indique la hauteur du contact en cm.

Pour le contact de 2 cm, on établit une fréquence de coupure à 25,6 kHz qui correspond à une profondeur de 3,1 cm, soit une profondeur très proche de celle de la partie supérieure de la fissure. Rien ne permet de distinguer si la fissure se prolonge sous le contact. Pour les contacts supérieurs à 2 cm, les coupures interviennent pour des fréquences supérieures à 30 kHz.

Dans l'objectif de l'auscultation, la taille du contact est un paramètre important. Il modifie la quantité d'énergie transmise par le contact. Si le contact est grand, le seul phénomène de filtrage observable est celui lié à la partie superficielle de la fissure. Si ce contact est petit, il y aura peu d'énergie transmise, l'influence de la partie profonde de la fissure est encore visible sur les courbes de rapport de spectres. Pour notre méthode, cela signifie que la profondeur estimée de la fissure sera comprise entre sa profondeur totale et la profondeur du contact.

•Série III

La troisième série d'essais a pour objectif de déterminer l'influence de la position du contact dans la fissure. Nous avons modélisé des fissures avec un contact de 0,5 cm dont la profondeur varie de 1 à 9 cm (Cf. Figure 5.16). On constate que les courbes de rapports de spectres obtenues restent très semblables pour toutes les positions du contact (Cf. Figure 5.17). Seule, le niveau du palier après la coupure est modifié : quand le contact est superficiel, il y a plus d'énergie transmise à hautes fréquences.

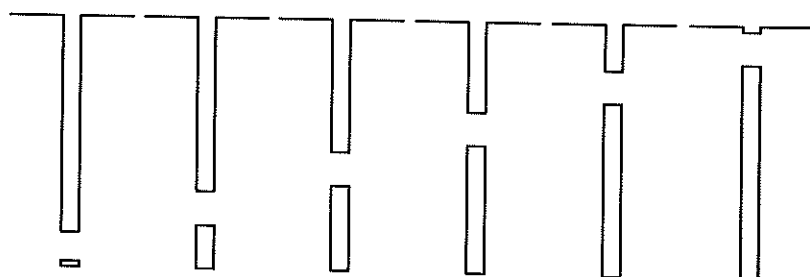


Figure 5.16 : Schéma des modèles utilisés pour étudier l'influence de la position d'un contact (Série III).

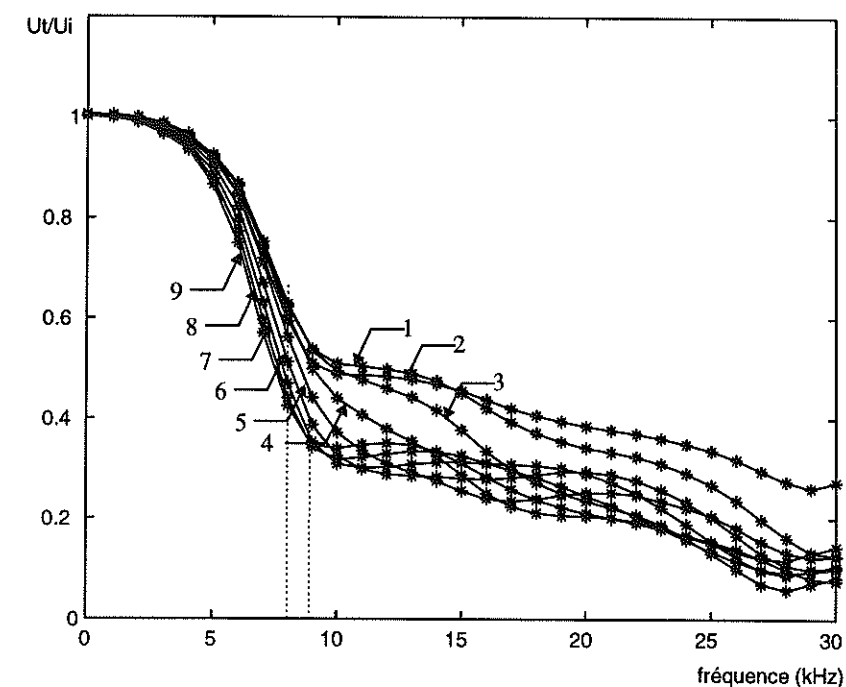


Figure 5.17 : Rapports de spectres calculés pour les modèles de la série III (Cf. Figure 5.16). le numéro de chaque courbe indique la profondeur du contact en cm.

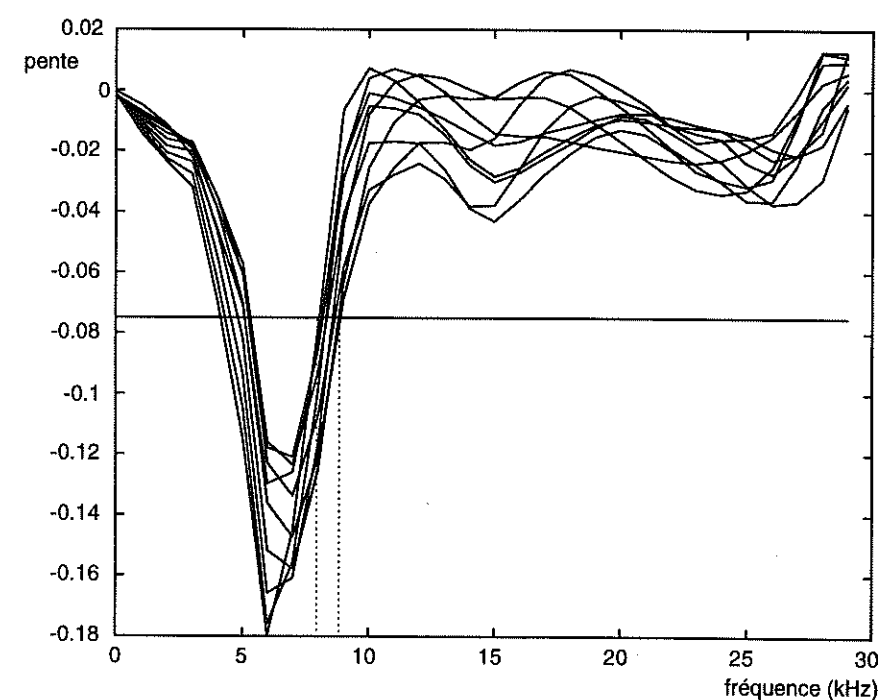


Figure 5.18 : Pentés des courbes de la Figure 5.17. Les pointillés indiquent l'intervalle des fréquences de coupure.

Cette variation modifie légèrement la pente des courbes (Cf. Figure 5.18), les fréquences de coupures déterminées selon notre critère sont comprises entre 8,0 et 8,9 kHz soit une profondeur comprise entre 9,1 cm et 10,1 cm. L'influence de la position de ce contact de 0,5 cm est faible.

•Série IV

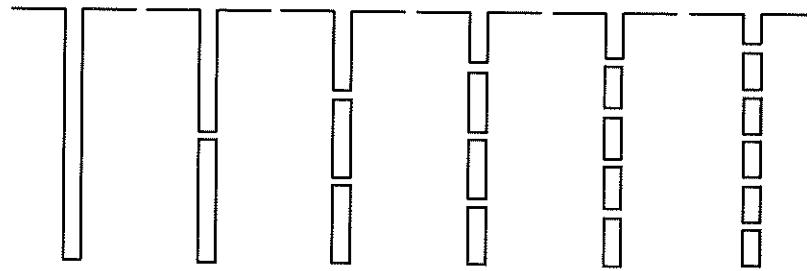


Figure 5.19 : Schéma des modèles utilisés pour étudier l'influence du nombre de contacts (Série IV).

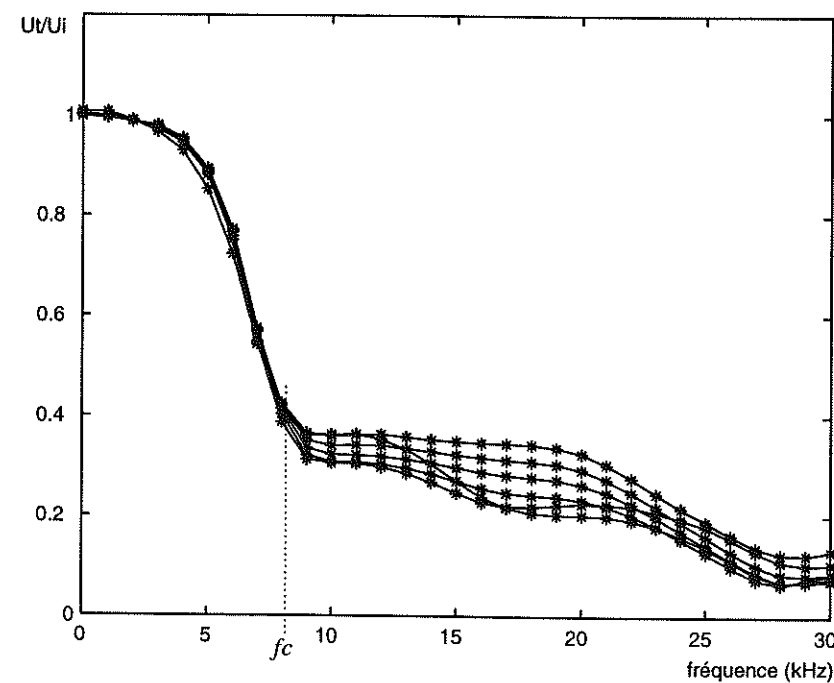


Figure 5.20 : Rapports de spectres calculés pour les modèles de la série IV (Cf. Figure 5.19).

Pour ce dernier essai, nous avons réalisé différents modèles de fissures avec 1 à 5 contacts régulièrement espacés, de 0,25 cm de hauteur chacun (Cf. Figure 5.19). La

taille de ce contact est choisie pour permettre une augmentation graduelle de sa surface totale sachant qu'un seul de ces contacts n'a quasiment pas d'effet sur le rapport de spectres. On constate que la multiplication de ces petits contacts modifie très peu les courbes de rapports de spectres (Cf. Figure 5.20). Seul le niveau du palier après la fréquence de coupure varie. Ce phénomène s'explique par le fait que le premier contact est de plus en plus superficiel. Il transmet plus d'énergie à hautes fréquences (Cf. Série III). L'énergie transmise par ces contacts est bien inférieure à celle qui pourrait être transmise par un seul contact dont la surface serait de 1,25 cm. Des petits contacts même s'ils sont nombreux ne perturbent pas le phénomène de filtrage de l'onde par la fissure. On pourra déterminer dans tous les cas de cette série, une fréquence de coupure correspondant à la profondeur totale de la fissure.

5.2.3 Etude expérimentale de la fissure avec contact.

5.2.3.a Construction de la fissure avec un contact.

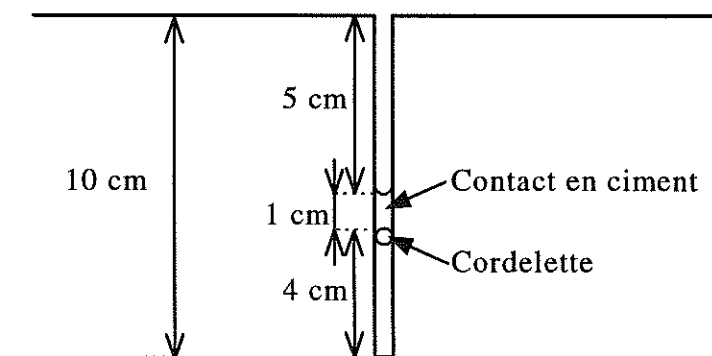


Figure 5.21 : Schéma de la fissure expérimentale avec contact.

Pour vérifier expérimentalement les observations faites à partir de la modélisation numérique, nous avons réalisé une fissure avec un contact dans la dalle d'essai n°1 (Cf. Chap. 3, §3.1.2.a). Cette fissure, insérée par sciage, a une profondeur de 10 cm et une épaisseur de 0,5 cm sur une longueur de 2 m. Pour la construction du contact, une cordelette d'un diamètre légèrement supérieur à l'épaisseur de la fissure a été introduite en force à une profondeur de 6 cm. Après avoir vérifié que son effet est négligeable sur la propagation des ondes, 1 cm de ciment a été coulé sur ce support

sur toute la longueur de la fissure. Ce modèle expérimental de fissure avec contact est très proche de ce que nous avons modélisé numériquement (Cf. Figure 5.21).

La taille du contact a été choisie en fonction des résultats de la modélisation numérique. Un contact de 1 cm introduit une modification observable sur la courbe de rapport de spectre mais insuffisante pour masquer totalement l'influence de la partie profonde de la fissure (Cf. §5.2.2.b). La profondeur estimée est intermédiaire entre la profondeur du contact et celle de la fissure entière.

5.2.3.b Méthode temporelle.

Le dispositif expérimental utilisé pour ausculter cette fissure par la méthode temporelle est décrit au chapitre 4 (§ 4.4). Les résultats obtenus sont comparés à une courbe théorique calculée pour une fissure de 5 cm de profondeur (Cf. Figure 5.22).

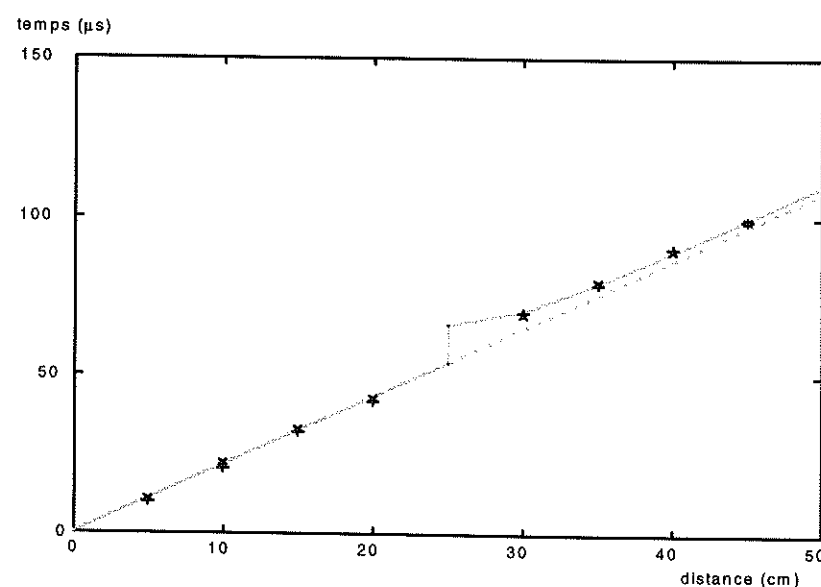


Figure 5.22 : Mesures temporelles d'auscultation sonore sur la fissure de 10 cm avec un contact en ciment à 5 cm de profondeur. La courbe théorique (en gris) est calculée pour une profondeur de fissure de 5 cm.

On constate un bon ajustement des points expérimentaux sur cette courbe. L'hypothèse selon laquelle la méthode temporelle ne fournit qu'une information sur la profondeur du premier contact est vérifiée expérimentalement. Ce résultat confirme également que le joint en ciment assure un contact mécanique entre les deux bords de la fissure.

5.2.3.c Méthode spectrale.

Pour l'auscultation de la fissure par la méthode spectrale, nous avons utilisé un dispositif désormais classique (Cf. Figure 5.23). La méthode a été employée avant et après l'introduction du contact pour vérifier l'effet de ce dernier. Les résultats sont comparés à deux courbes numériques calculées pour une fissure simple de 10 cm de profondeur et pour une fissure avec un contact de 1 cm à 5 cm de profondeur (Cf. Figure 5.24). Les courbes expérimentales avec ou sans contact sont semblables. On constate donc que ce contact n'a pas eu d'influence perceptible sur la diffraction de l'onde de Rayleigh. La fréquence de coupure est identique dans les deux cas.

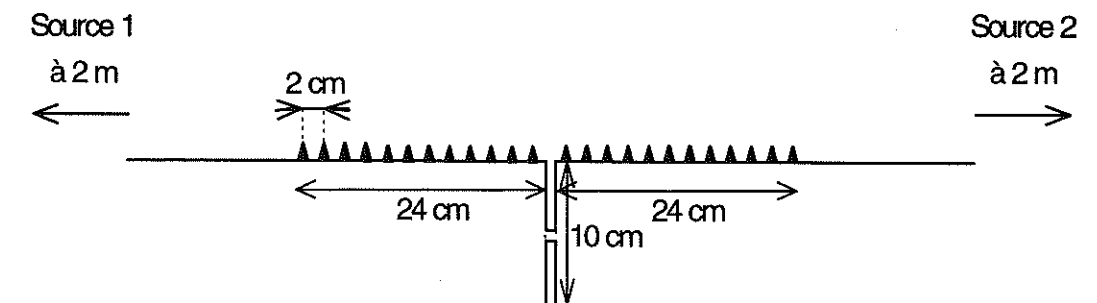


Figure 5.23 : Schéma du dispositif expérimental utilisé pour l'auscultation de la fissure avec contact par la méthode spectrale.

Numériquement, un contact de 1 cm modifie la courbe de rapport de spectre de façon sensible. Cette influence n'est pas observable expérimentalement. Cela est sans doute dû à la qualité du contact expérimental. Dans le cas numérique, le contact est parfait puisqu'il n'y a aucune discontinuité de matière entre le milieu environnant et le joint. Dans le cas expérimental, même si le matériau est très semblable (le ciment est le matériau liant du béton), les difficultés de mise en place du joint ne permettent pas d'assurer une continuité parfaite. Le contact numérique qui aurait une influence

similaire sur la courbe de rapport de spectres serait beaucoup plus petit (de l'ordre de 0,1 cm)

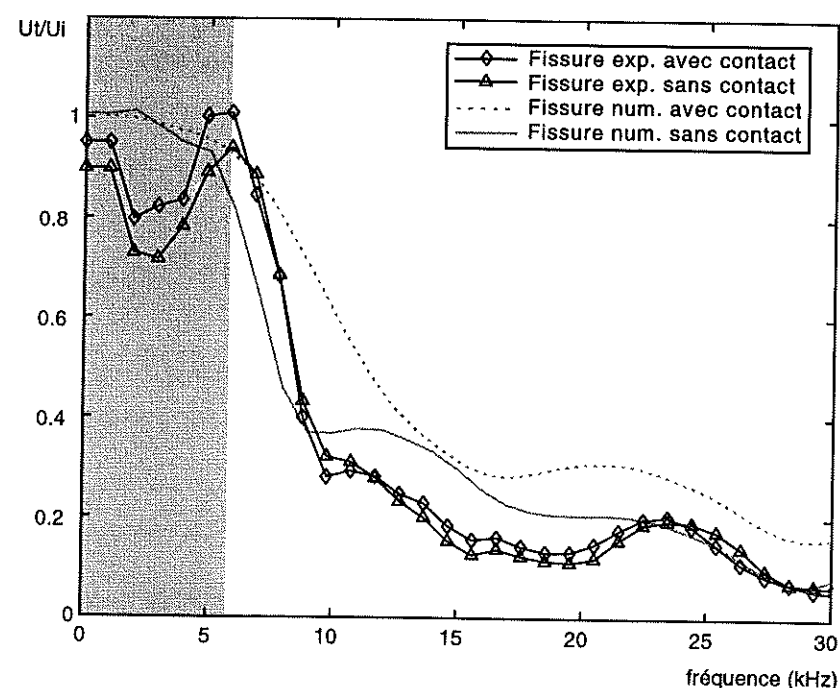


Figure 5.24 : Rapports de spectre obtenus pour la fissure expérimentale de 10 cm avec et sans contact comparés aux rapports de spectres numériques calculés pour des conditions similaires.

5.2.4 Conclusion

L'étude numérique de différents cas de fissures avec contacts a permis d'établir le rôle de ces contacts sur la diffraction de l'onde de Rayleigh. Elle a mis en évidence l'importance de leur taille pour la transmission de l'énergie. Un contact de grande taille (supérieure à 2 cm) transmet suffisamment d'énergie pour masquer le phénomène de filtrage de l'onde de Rayleigh par la fissure entière. Seule la partie superficielle de la fissure joue encore ce rôle de filtre. En conséquence, on ne pourra déterminer que la profondeur du contact par la méthode spectrale d'auscultation. Néanmoins si ce contact à une petite taille, l'énergie transmise ne suffira pas à masquer complètement l'influence de la partie profonde de la fissure. Il est cependant difficile de déterminer la profondeur totale de la fissure. On montre que, dans ce cas, la profondeur de la fissure évaluée par la méthode spectrale est comprise entre celle du premier contact et celle de la fissure entière.

Cette information complète l'information donnée par la méthode temporelle. En effet, on vérifie expérimentalement que cette méthode ne fournit que la profondeur du premier contact. Si la profondeur de la fissure évaluée par la méthode spectrale est supérieure à celle établie par la méthode temporelle, on peut en conclure que :

- 1) la valeur de profondeur établie par la méthode temporelle est celle du premier contact,
- 2) la fissure se prolonge sous ce contact,
- 3) sa profondeur totale est au moins supérieure à la valeur établie par la méthode spectrale.

L'utilisation de ces deux méthodes en parallèle permet d'améliorer la caractérisation de la fissure. Sur notre site expérimental, la méthode spectrale a permis d'évaluer la profondeur de la fissure entière. L'influence du contact n'a pas pu être observée. Cela est sans doute lié à la qualité du joint en ciment. Ce joint assure un contact mécanique réel entre les deux bords de la fissure puisqu'il a été détecté par la méthode temporelle. Il ne permet néanmoins pas la transmission de suffisamment d'énergie pour modifier de façon perceptible la propagation des ondes de Rayleigh.

5.3 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons appliqué à des cas particuliers de fissures artificielles, deux méthodes sismiques d'auscultation des fissures de surface. Nous avons mis en évidence leur complémentarité. L'utilisation parallèle de ces deux méthodes améliore réellement la caractérisation des fissures de surface. On peut rappeler que ces deux méthodes ont des mises en oeuvre similaires. Leur emploi simultané ne nécessite qu'un très faible surcoût expérimental.

Nous avons étudié le problème de la présence de l'eau dans les fissures. En pratique, l'énergie transmise à travers l'eau dans la fissure est très faible, elle n'a pas pu être observée expérimentalement. Les deux méthodes donnent des résultats

cohérents. La présence d'eau ne perturbe pas l'évaluation de la profondeur de la fissure.

L'étude de fissures avec contacts a permis d'établir de façon précise le rôle d'un contact dans la transmission de l'énergie d'une onde de Rayleigh. Selon sa taille, la quantité d'énergie transmise sera plus ou moins importante. On montre également que plusieurs petits contacts n'ont pas la même influence qu'un seul de grande taille.

Du point de vue de l'auscultation, la présence d'un contact n'a pas les mêmes conséquences pour les deux méthodes. Elles fournissent des informations complémentaires. La méthode temporelle indique la profondeur du premier contact, la méthode spectrale permet de vérifier si la fissure se prolonge sous ce contact et donne une valeur minimum de la profondeur totale de la fissure. Dans le cas de très petits contacts (de l'ordre de 1/100 de la profondeur de la fissure), c'est la profondeur totale de la fissure qui est estimée. Ces résultats confirment l'intérêt d'une utilisation simultanée des deux méthodes pour la caractérisation des fissures de surface.

Chapitre 6

Auscultation d'une fissure réelle sur un ouvrage d'art

Chapitre 6

Auscultation d'une fissure réelle sur un ouvrage d'art

6.1 PRESENTATION DE L'OUVRAGE.

L'ouvrage sur lequel nous avons testé nos méthodes d'auscultation est un pont à dalles nervurées construit entre 1974 et 1975, mis en service en 1977. Il permet le franchissement de la route départementale 42 par la rocade de Nantes (A 821) à hauteur d'Orvault. Il est constitué de trois travées continues de portées 25,00 m, 43,20 m et 27,15 m. Les deux nervures sont précontraintes longitudinalement avec des entretoises sur appuis.

Diverses fissures ont été observées au décoffrage du tablier en 1975. Selon les documents que nous avons pu obtenir de la Direction Départementale de l'Équipement de Loire-Atlantique, ces fissures sont liées à une mauvaise prise en compte des efforts subis par le tablier lors de la phase de mise en tension des câbles de précontrainte. La mise en butée du tablier sur les murs garde-grève est également mentionnée dès 1977. Une partie du mur garde-grève a été démolie et reconstruite à cette époque pour laisser un jeu plus important entre le tablier et les culées. Cette opération n'a cependant pas pu être effectuée entièrement pour des raisons de délai de mise en service. Plusieurs visites ont été effectuées depuis pour contrôler l'évolution des fissures. Certaines fissures ont été injectées, il semble qu'elles ne soient plus vivantes. Par contre, des mesures précises du blocage du tablier contre les culées sont actuellement envisagées pour vérifier si des travaux plus importants sont nécessaires.

La fissure que nous avons choisie pour tester les méthodes d'auscultation est une fissure verticale de 2,6 m de long située sur l'extrémité ouest du tablier, entre les deux nervures. Elle est relativement isolée des autres fissures et se situe au milieu d'une surface importante. L'épaisseur du béton à cet endroit est de l'ordre d'un mètre, la largeur entre les nervures est de 6 m. L'accessibilité de cette partie du pont est

également un atout pour la mise en oeuvre expérimentale. Ces conditions nous ont paru propices à l'utilisation de nos méthodes d'auscultation.

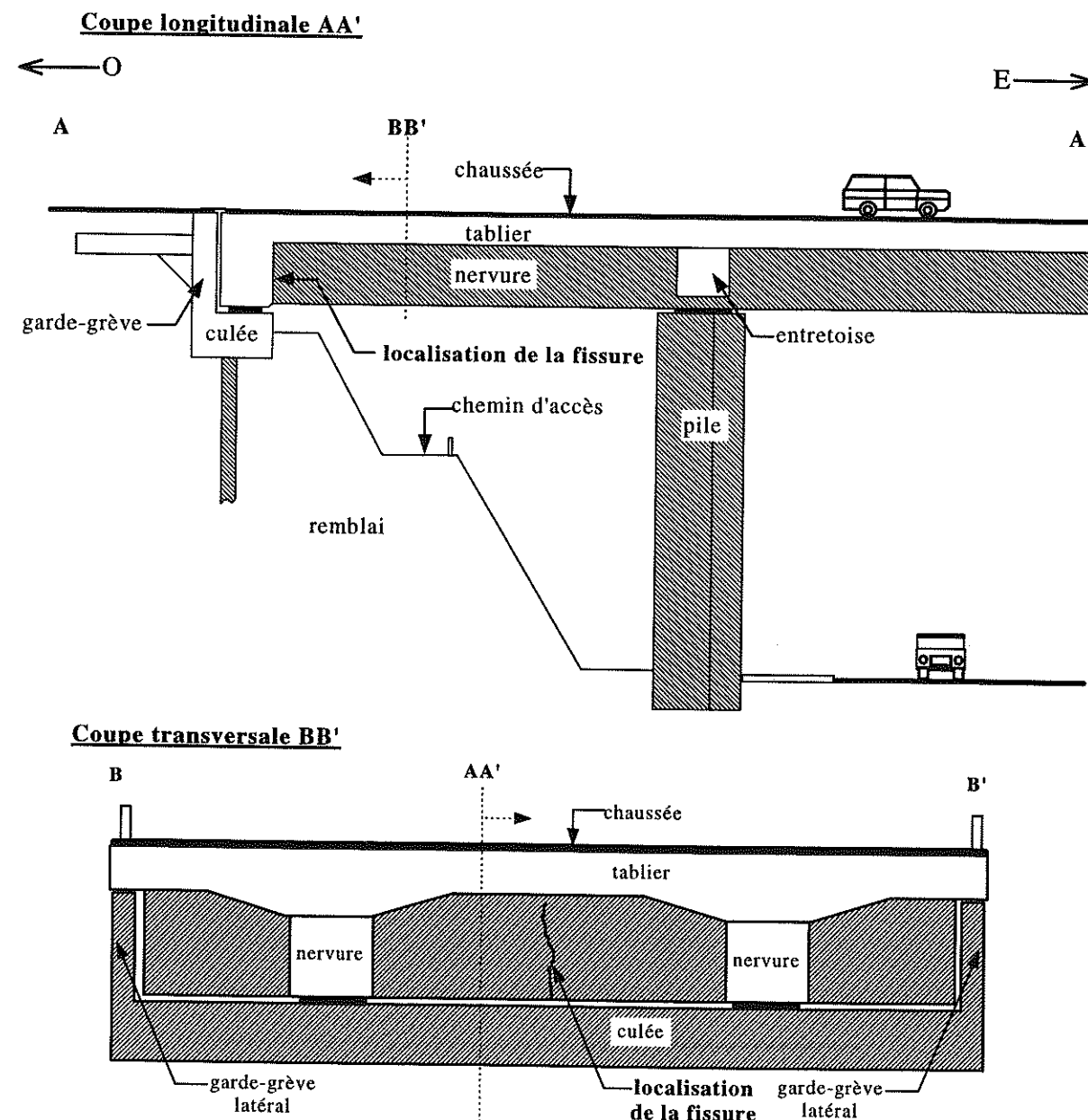


Figure 6.1 : Coupes schématiques du pont d'Orvault. La fissure est située sur l'extrémité ouest du tablier en appui sur la culée. Les parties grisées sont en retrait du plan de coupe.

Les conditions de circulation sur l'A 821 sont très importantes tout au long de la journée. Ce trafic est une contrainte dont il faut tenir compte à cause du bruit occasionné par le passage des véhicules. Néanmoins, ce bruit est très basses fréquences (de l'ordre de la centaine de Hertz). Il est largement en-dessous de la gamme de fréquence utilisée pour l'auscultation.

6.2 MISE EN OEUVRE EXPERIMENTALE.

6.2.1 Adaptation de la source aux conditions de surface.

Pour la méthode spectrale d'auscultation, l'énergie qui se propage dans la structure est générée par l'impact d'une masse sur la surface. Tous les essais que nous avons réalisés jusqu'ici concernaient des dalles horizontales. La source est une bille d'acier lâchée de 40 cm au-dessus de la surface. Afin de contrôler les paramètres de la chute, on réalise cette manipulation avec un électro-aimant fixé sur un trépied. On contrôle ainsi parfaitement la hauteur de chute et le lâcher de la bille (Cf. Chap. 3, §3.1.2.b).

La fissure du pont d'Orvault est ouverte sur une surface verticale. Nous avons dû adapter notre système de source à cette contrainte (Cf. Figure 6.2). Nous avons essayé de garder un système proche de celui que nous avons utilisé précédemment pour pouvoir éventuellement comparer les résultats. L'élément d'impact reste une bille d'acier. Cette bille a été suspendue à un fil de nylon fixé à la paroi de l'ouvrage. Ce système de pendule est complété par un électro-aimant adapté sur une perche qui permet de contrôler la position initiale de chute et le lâcher de la bille. On obtient ainsi des impacts répétitifs avec une localisation très précise. Ce système de source est plus contraignant que le précédent sur surface horizontale : il nécessite de disposer d'une hauteur suffisante au-dessus du point d'impact pour fixer le pendule. La hauteur de chute est limitée par la longueur du fil que l'on peut mettre en place. Il permet néanmoins de travailler sur la surface verticale dans des conditions similaires aux surfaces horizontales.

Une autre modification du système est apparue nécessaire au niveau du point d'impact sur la surface. Le béton qui compose la structure du pont paraît très altéré sur certaines zones. Il semble plus friable et présente une couleur légèrement verdâtre. La répétition de plusieurs impacts de bille sur ces zones provoque de petits effritements qui modifient la surface. Cela affecte de façon non négligeable la répétitivité des chocs. Pour éviter ce problème, nous avons collé à l'endroit de l'impact une pastille métallique de 2 cm de diamètre. Elle permet la transmission de l'énergie dans la structure en protégeant la surface de l'impact. L'influence réelle de

cette pastille n'a pas été étudiée en détail. Elle modifie sans doute la forme du signal et la quantité d'énergie transmise dans la structure. Elle peut jouer le rôle d'un filtre ou au contraire amplifier certaines bandes de fréquences. Elle assure néanmoins une parfaite répétitivité des impacts, ce qui permet d'améliorer la qualité globale des signaux.

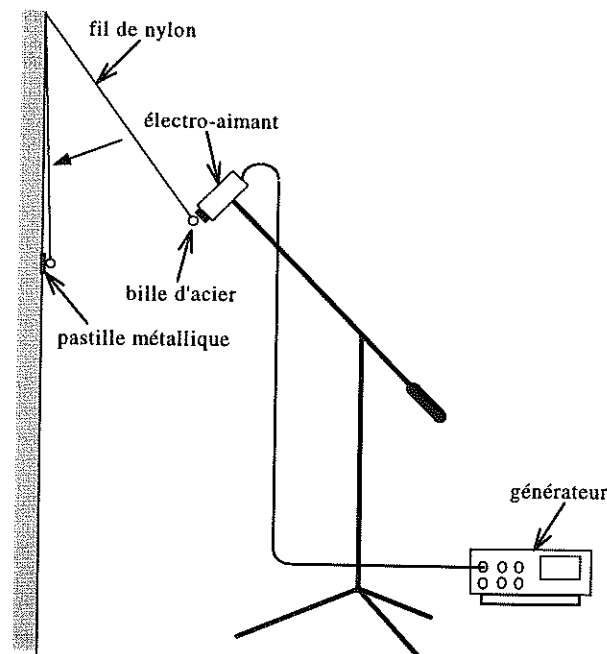


Figure 6.2 : Système de la source d'impact sur surface verticale.

6.2.2 Adaptation fréquentielle de la source.

Lors des premiers essais réalisés, différents problèmes liés aux conditions expérimentales se sont posés. Ces essais nous ont permis de remarquer que le phénomène de filtrage des ondes de Rayleigh par la fissure devait avoir lieu pour des fréquences inférieures à 10 kHz. Comme nous l'avons vu précédemment (Cf. Chap. 3, § 3.1.1.b), la largeur du spectre émis dans un milieu par un impact est contrôlée par le temps de contact entre la surface du milieu et la masse qui la frappe. Plus celui-ci est bref, plus le spectre sera hautes fréquences. Ce temps de contact est proportionnel à la taille de la bille. Pour recentrer le signal-source sur une gamme de fréquences plus basses, nous avons utilisé une bille de 15 mm de rayon. Le spectre d'amplitude d'un

impact ainsi généré sur du béton est centré sur 7 kHz environ, de l'énergie est émise sur une bande allant de 1 à 20 kHz (Cf. Figure 6.3).

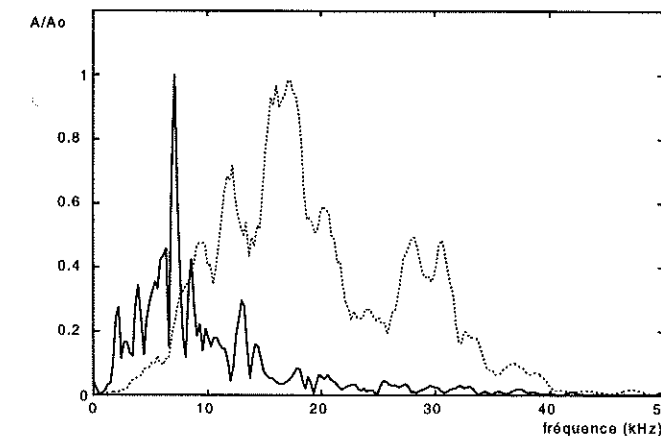


Figure 6.3 : Exemples de spectres d'amplitude normalisés générés par l'impact d'une bille de 30 mm de diamètre (courbe pleine) et 12 mm de diamètre (courbe pointillée).

Le choix de ce changement de source ne se justifie que parce que nous avons fait une première série d'essais qui nous a permis d'évaluer la bande de fréquences intéressante. Dans des conditions réelles d'auscultation, il serait intéressant d'avoir une source qui génère de l'énergie de façon équivalente dans une large gamme de fréquence pour couvrir toutes les profondeurs de fissure possibles. La mise au point d'une telle source est une piste de recherche. A défaut, l'utilisation d'un jeu de différentes billes permet de s'adapter à chaque cas particulier d'auscultation. On s'assure ainsi que suffisamment d'énergie est générée dans la gamme de fréquences intéressante.

6.3 AUSCULTATION DE LA FISSURE.

6.3.1 Méthode temporelle.

Le dispositif utilisé pour ausculter cette fissure a été installé en deux endroits différents : à 75 cm et 135 cm de l'arête inférieure du bloc (Cf. Figure 6.4). C'est un dispositif de 9 capteurs. Pour chaque dispositif la source est placée une fois à droite

et une fois à gauche des capteurs. On obtient ainsi deux mesures au même endroit. Les résultats de l'auscultation sont présentés Figure 6.5.

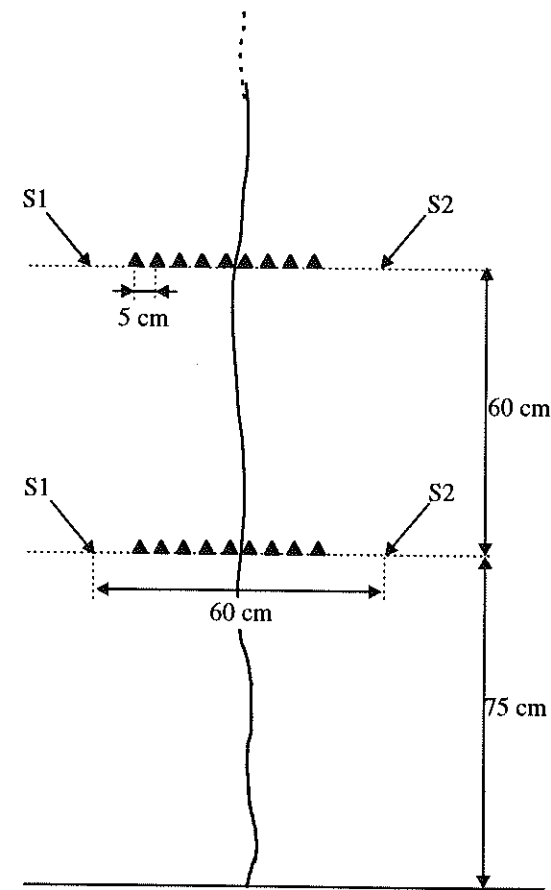


Figure 6.4 : Dispositifs pour l'auscultation par la méthode temporelle. La source est située en S1 puis en S2 pour les deux localisations.

La première chose que l'on peut constater est que la qualité des résultats est inférieure à celle que l'on avait pu obtenir sur les dalles expérimentales. Le pointé des temps d'arrivée est délicat pour certains enregistrements, certains points de mesures semblent aberrants. Une vitesse de 4500 ± 500 m/s est évaluée d'après le pointé des temps d'arrivés sur les signaux enregistrés avant la fissure. Elle permet le calcul de deux courbes théoriques présentées sur les figures. Ces courbes correspondent à des profondeurs de 8 cm pour la première et 19 cm pour la seconde. Elles sont relativement cohérentes avec les points de mesures mais la précision de ces derniers et l'incertitude sur la vitesse ne permettent pas de situer ces profondeurs à moins de 3,5 cm près.

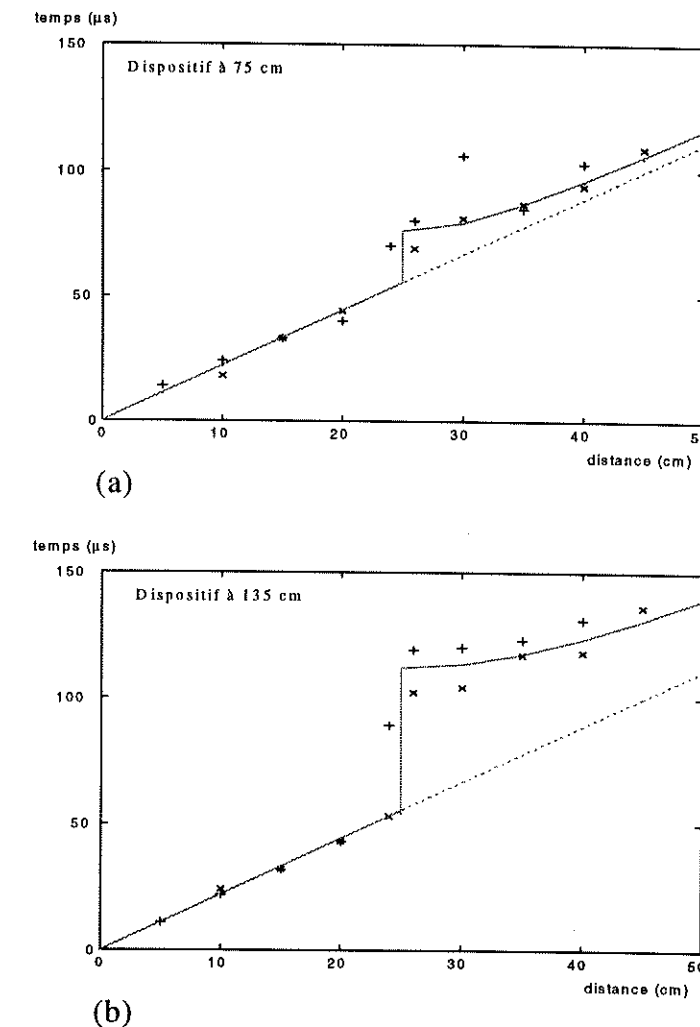


Figure 6.5 : Résultats de l'auscultation temporelle pour les deux points de mesure de la fissure. Les courbes théoriques (en gris) sont calculées pour des profondeurs de 8 cm de profondeur (a) et 19 cm de profondeur (b) pour une vitesse de 4500 m/s.

Les résultats de cette auscultation indiquent une fissure dont la profondeur n'est pas constante, à 75 cm, la profondeur évaluée est de $8 \pm 3,5$ cm, à 135 cm, elle est de $19 \pm 3,5$ cm.

6.3.2 Méthode spectrale.

Le dispositif expérimental mis en place pour l'auscultation de la méthode spectrale est composé de 24 capteurs (12 capteurs de chaque côté de la fissure) installés le long d'une ligne perpendiculaire à la fissure. La distance intercapteurs est

de 2 cm. La source est située une fois à droite et une fois à gauche du dispositif à 150 cm de la fissure. Ce dispositif a été installé aux deux positions auscultées par la méthode temporelle (Cf Figure 6.6).

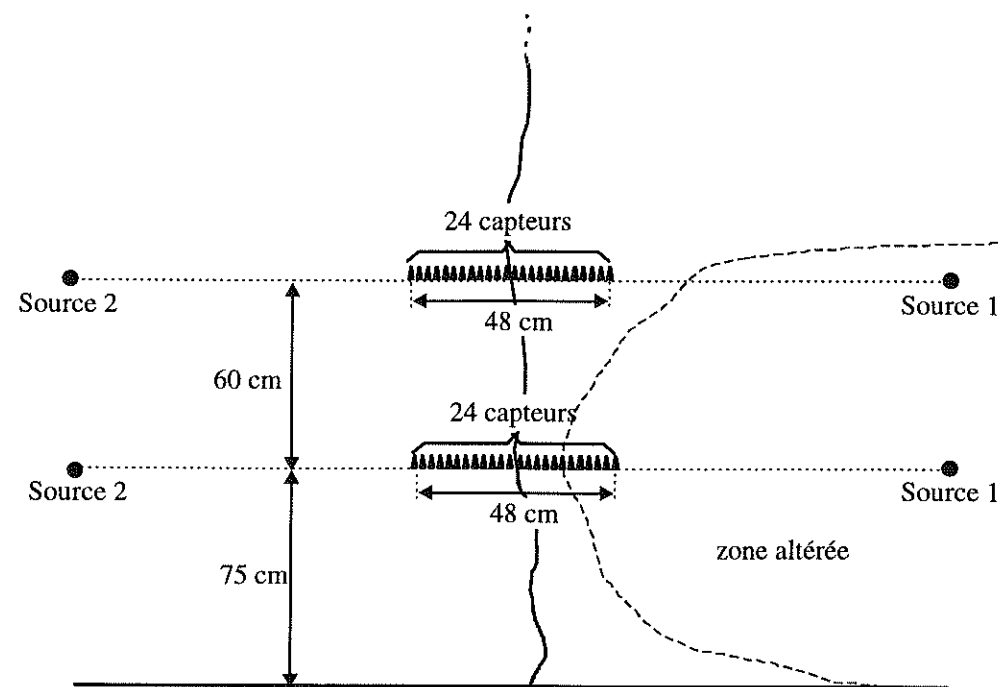


Figure 6.6 : Schéma du dispositif expérimental utilisé pour l'auscultation par la méthode spectrale. Sur la partie droite du bloc (zone en pointillé), le béton paraît plus altéré.

La zone délimitée en pointillé sur le schéma de la Figure 6.6 paraît plus altérée que le reste du bloc, l'aspect extérieur du béton est légèrement verdâtre et le matériau semble plus friable. L'amplitude des signaux enregistrés est beaucoup plus faible (environ 25%) quand la source est située sur cette zone (source 1) plutôt que sur une zone apparemment plus saine (source 2). Cette atténuation des ondes par la zone altérée est un phénomène qui influence de façon non négligeable la forme des signaux. Selon notre procédure de traitement des données expérimentales, l'influence du signal-source est théoriquement éliminée (Cf. Chap. 4, § 4.3.1), l'atténuation des ondes ne pose pas de problème dans la mesure où un minimum d'énergie se propage. La Figure 6.7 montre une série de signaux enregistrés quand la source est située dans la zone altérée.

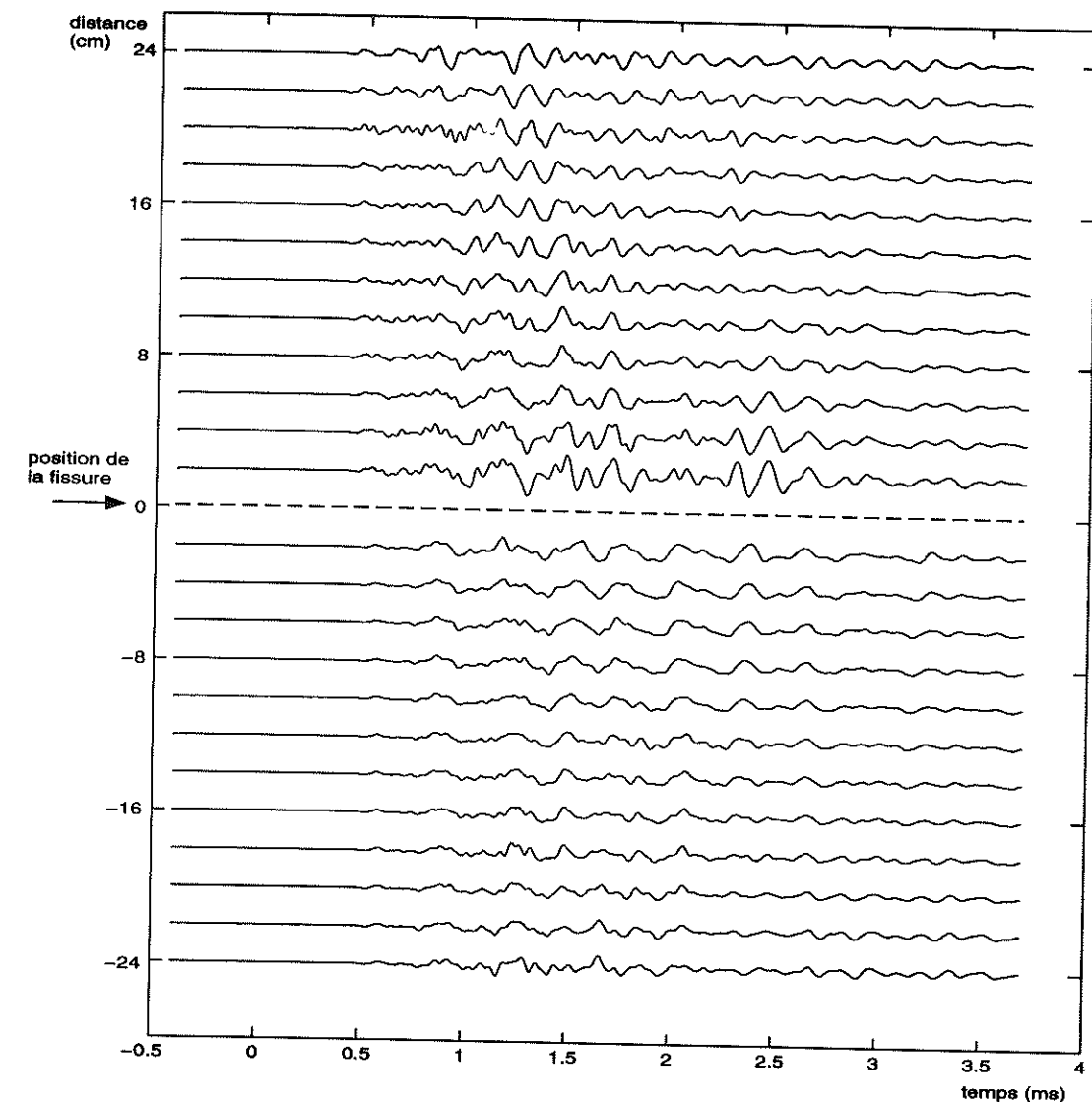


Figure 6.7 : Signaux expérimentaux enregistrés par le dispositif à 75 cm pour une source située dans la zone altérée (Source 1 sur la Figure 6.6). Ces signaux sont sommés (10 signaux) et filtrés à 25 kHz.

Les rapports de spectres, pour le dispositif à 75 cm de l'arête inférieure du bloc, sont présentés Figure 6.8. Ils ont été calculés pour 12 couples de capteurs. On constate que ces courbes sont relativement cohérentes jusqu'à 10 kHz mais qu'elles présentent des différences importantes pour les fréquences supérieures. L'écart-type de ces courbes est inférieur à 0,2 entre 0 et 10 kHz, il atteint des valeurs supérieures à 1 pour les fréquences plus hautes. Entre 0 et 10 kHz, on observe une chute d'énergie qui correspond au filtrage des ondes par la fissure. La fréquence de coupure établie à partir de la pente de la courbe moyenne (Cf Figure 6.9) indique une valeur de $3,7 \pm 0,3$ kHz.

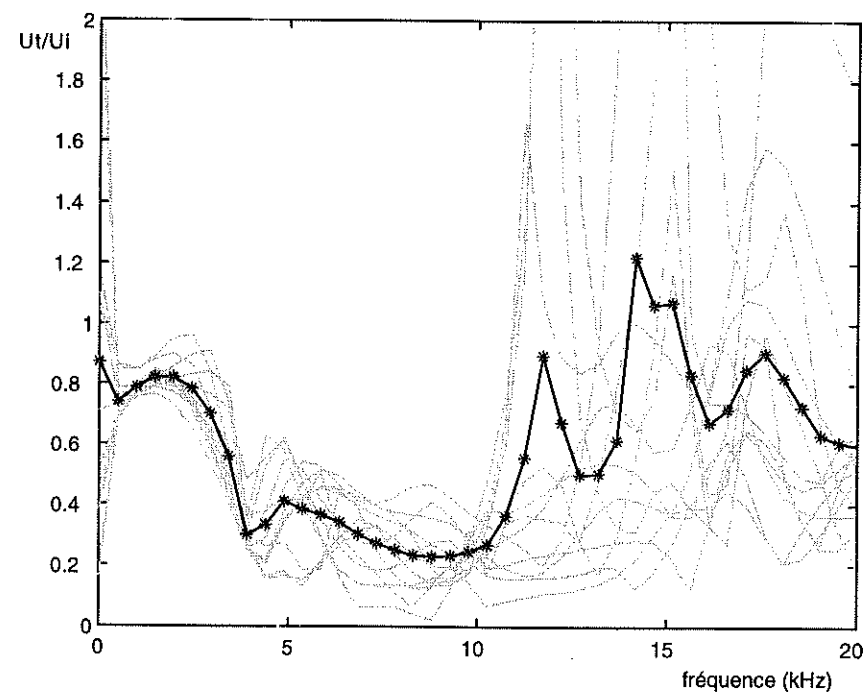


Figure 6.8 : Rapports de spectres calculés pour le dispositif à 75 cm pour les 12 couples de capteurs. La courbe noire (*) est la courbe moyenne.

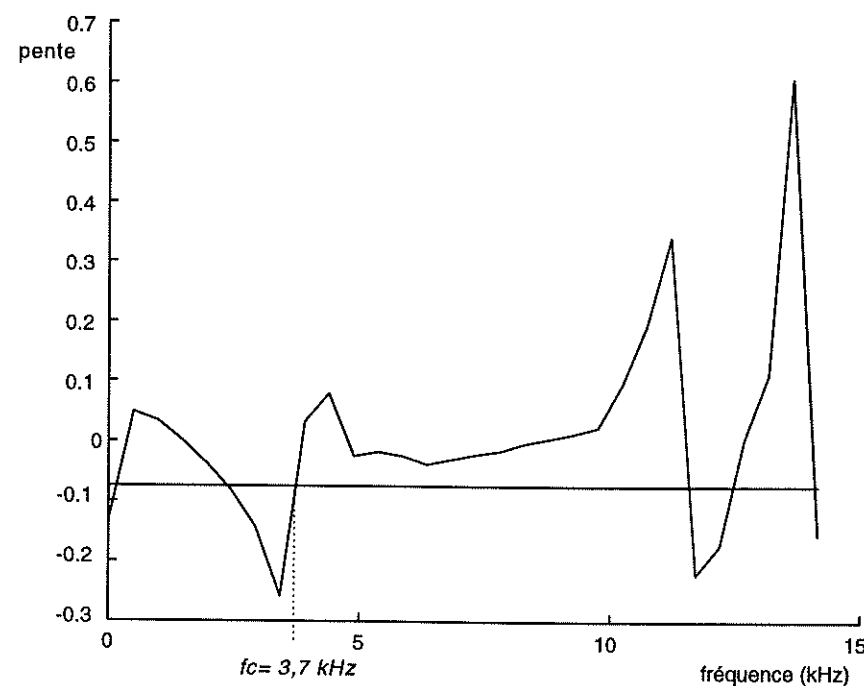


Figure 6.9 : Courbe de pente de la courbe moyenne de la Figure 6.8. La fréquence de coupure est évaluée à 3,7 kHz.

Pour calculer la profondeur de la fissure, il est nécessaire d'évaluer la vitesse de propagation des ondes de Rayleigh dans le matériau. Les signaux enregistrés avant la fissure sont traités selon la méthode SASW (Cf. Chap. 1, §1.3.2). Cette méthode permet d'évaluer une vitesse de phase moyenne de 2100 ± 300 m/s dans la bande de fréquence de 0 à 10 kHz (Cf Figure 6.10). A partir de la fréquence de coupure et selon l'équation 4.5, on estime la profondeur à $21,7 \pm 4,9$ cm.

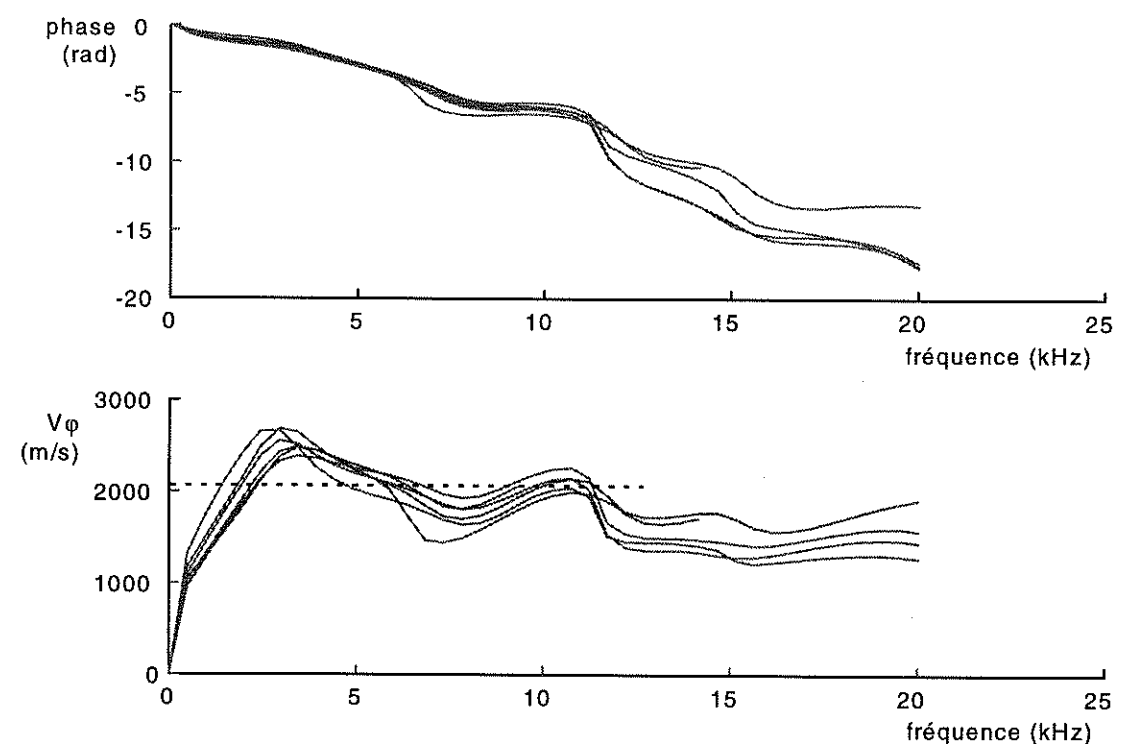


Figure 6.10 : Exemples de courbes de déphasage (phase "déroulée") et de courbes de dispersion obtenues pour des couples de capteurs situés avant la fissure lors de l'auscultation. La vitesse moyenne est de 2100 m/s dans une bande de fréquences allant de 2 à 10 kHz.

La Figure 6.11 permet de comparer la courbe de rapport de spectres obtenue avec une courbe établie par un modèle numérique d'une fissure de 22 cm de profondeur et 0,7 cm d'épaisseur. On constate que la chute d'énergie a lieu pour des fréquences similaires. La fissure réelle est équivalente à la fissure numérique.

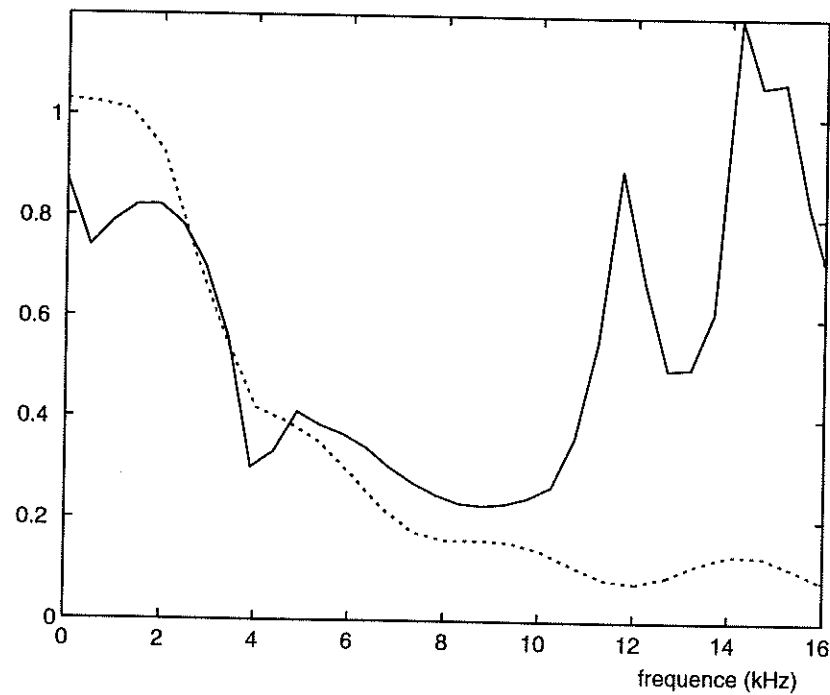


Figure 6.11 : Comparaison de la courbe de rapport de spectres du premier dispositif (courbe pleine) avec une courbe numérique établie pour une fissure de 22 cm de profondeur (courbe pointillée).

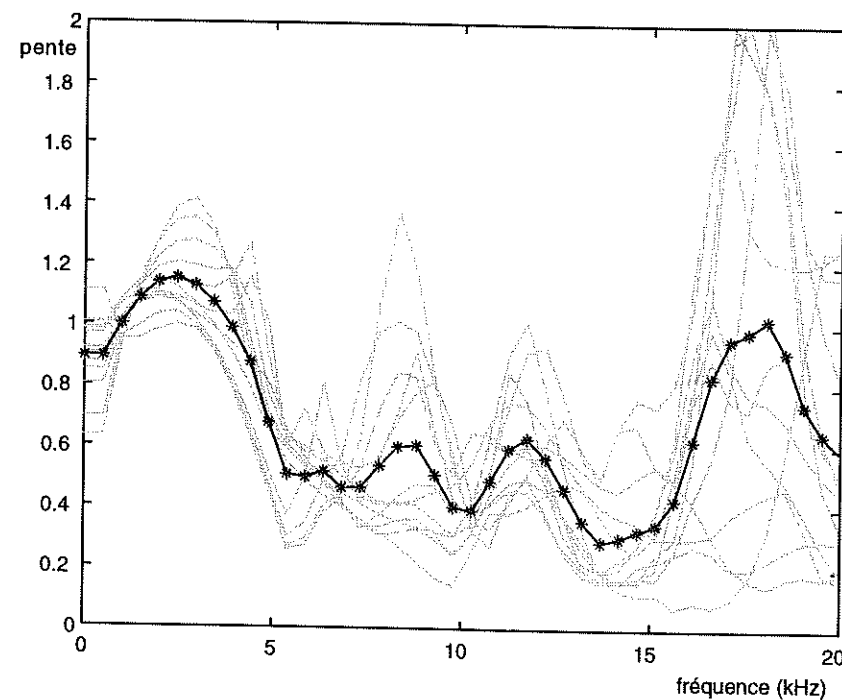


Figure 6.12 : Rapports de spectres calculés pour le dispositif à 135 cm pour les 12 couples de capteurs. La courbe noire (*) est la courbe moyenne.

Pour le second dispositif, les données ont été traitées de la même façon. On constate que les courbes de rapports de spectres n'ont pas la même cohérence même à basses fréquences (Cf Figure 6.12). Cependant, elles indiquent toutes la même coupure d'énergie. L'écart-type de ces courbes est inférieur à 0,2 jusqu'à 7,5 kHz. La fréquence de coupure établie à partir de la pente de la courbe moyenne est de $5,2 \pm 0,2$ kHz. On pourra remarquer que cette courbe de pente est très chahutée à hautes fréquences. Les pics de pente pour les fréquences supérieures à 7,5 kHz ne sont pas pris en compte. De même que pour la fissure précédente, on considérera que celle-ci est équivalente à une fissure de 0,5 cm d'épaisseur pour laquelle on calcule une profondeur de $15,0 \pm 2,7$ cm.

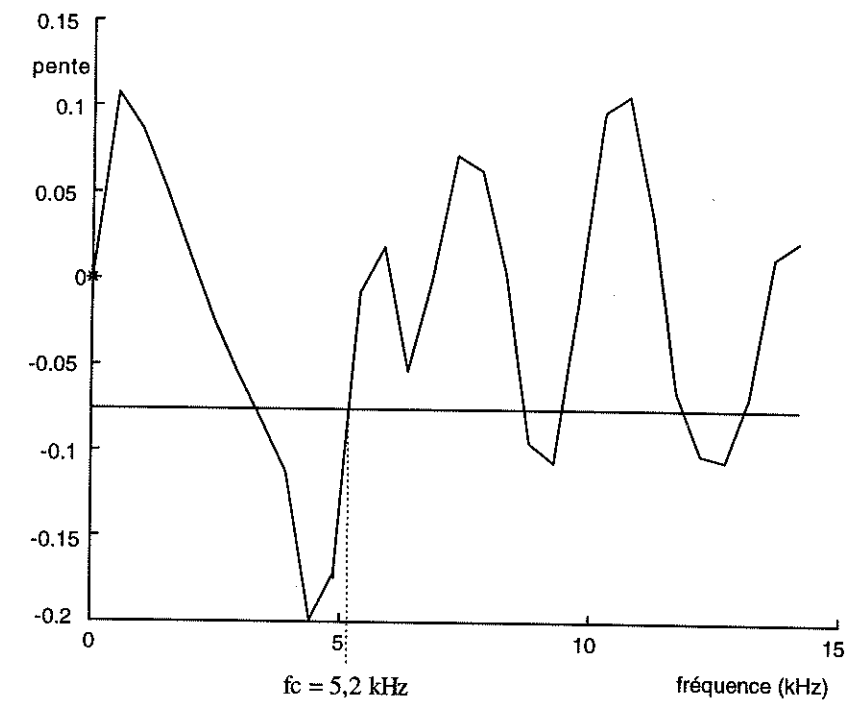


Figure 6.13 : Courbe de pente de la courbe moyenne de la Figure 6.12. La fréquence de coupure est évaluée à 5,2 kHz.

Nous obtenons donc deux évaluations de la profondeur de la fissure en deux points différents. A 75 cm de l'arête inférieure du bloc de béton, la profondeur évaluée est de $21,7 \pm 4,9$ cm, à 135 cm, elle est de $15,0 \pm 2,7$ cm. Ces deux valeurs sont relativement proches. La profondeur de la fissure diminue vers le haut de la structure.

6.4 CONCLUSION.

Pour ausculter une fissure sur le pont d'Orvault, nous avons appliqué les deux méthodes sismiques décrites précédemment. L'auscultation a été réalisée en deux points différents : le premier à 75 cm de hauteur, le second à 135 cm. Les résultats de ces deux méthodes sont récapitulés dans le tableau suivant :

	méthode temporelle	méthode spectrale
point 1 (75 cm)	$8 \pm 3,5$ cm	$21,7 \pm 4,9$ cm
point 2 (135 cm)	$19 \pm 3,5$ cm	$15,0 \pm 2,7$ cm

Sur le premier point de mesure, les deux méthodes donnent des évaluations différentes de la profondeur de la fissure. La valeur obtenue par la méthode spectrale est supérieure à la valeur obtenue par la méthode temporelle. Dans ce cas de figure, on peut faire l'hypothèse que la première profondeur de $8 \pm 3,5$ cm, évaluée par la méthode temporelle, correspond à un contact entre les deux lèvres de la fissure, la méthode spectrale indique que la fissure se prolonge sous ce contact au moins jusqu'à une profondeur de $21,7 \pm 4,9$ cm.

Etant donné les incertitudes, les résultats sur le second point de mesure sont cohérents. Selon les observations que nous avons pu faire précédemment (Cf. Chap. 5, § 5.2), deux hypothèses sont envisageables pour ces valeurs : soit c'est une fissure simple d'environ 17 cm de profondeur, soit un contact entre les deux lèvres de la fissure existe à cette profondeur et il est suffisamment épais pour qu'on ne puisse pas voir l'influence de la partie plus profonde de la fissure. Dans ces deux cas la profondeur de la fissure est au moins de 15,5 cm.

La méthode temporelle détecte un contact à 8 cm au premier point de mesure. On peut remarquer que rien n'indique que la position de ce contact est à la verticale du point de mesure. En effet dans le cas d'un contact ponctuel, il peut se trouver sur un demi cercle de 8 cm de rayon dans le plan de la fissure (Cf Figure 6.14). La réalisation d'autres mesures proches permettrait de localiser plus précisément ce

contact. L'influence de contacts ponctuels pour les deux méthodes d'auscultation pourrait être analysée dans le cadre d'une extension à trois dimensions de notre étude.

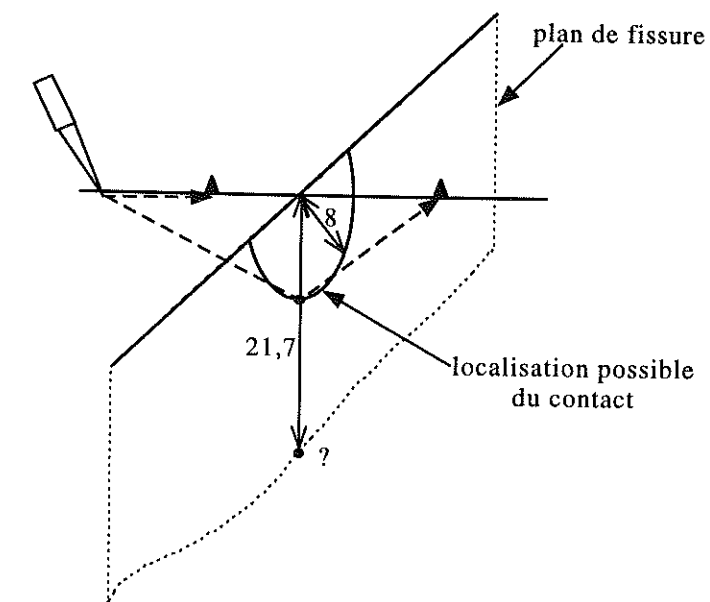


Figure 6.14 : Coupe schématique de la fissure au niveau du point de mesure n°1. Le contact est situé sur un demi-cercle de 8 cm de rayon.

Il serait également intéressant de pouvoir comparer ces estimations de profondeur à la position des armatures métalliques de la structure. En effet les armatures ont tendance à reprendre les amorces de fissure, elles pourraient également jouer un rôle de contact entre les deux bords de la fissure. Nous n'avons malheureusement pas pu obtenir de plan de construction de cet ouvrage pour vérifier s'il existe une corrélation entre les profondeurs estimées et celle des armatures.

La profondeur des fissures par rapport à celle des armatures est un paramètre important pour le diagnostic de l'état de l'ouvrage. Si les armatures sont accessibles, leur corrosion par l'humidité est possible avec toutes les conséquences que cela peut avoir sur la solidité de la structure. Disposer de moyens d'auscultation qui permettrait de le vérifier serait un atout. L'influence des armatures sur nos méthodes d'auscultation est une piste de recherche intéressante.

Conclusion

Conclusion

Durant ces vingt dernières années, la recherche géophysique a largement contribué à l'amélioration des connaissances sur la propagation des ondes mécaniques. Elle a développé de nombreuses techniques de reconnaissance mais également des outils de modélisation numérique pour l'étude des phénomènes de propagation. Le travail présenté dans ce rapport se situe dans le cadre d'un transfert de connaissances issues de la géophysique vers le domaine de l'auscultation des structures du génie civil.

Le premier objectif de cette thèse était d'évaluer les capacités des ondes de Rayleigh pour l'auscultation des structures. Une grande partie de l'énergie générée dans un milieu par un impact ponctuel sur sa surface, se propage sous forme d'onde de Rayleigh. Cette énergie reste localisée au voisinage de la surface libre et l'atténuation par expansion géométrique est plus faible que pour les ondes de volume. Les ondes de Rayleigh sont donc particulièrement énergétiques et faciles à générer. De plus, seul l'accès à une surface est nécessaire. Ces différentes propriétés sont très intéressantes pour le contrôle non destructif, les ondes de Rayleigh semblent particulièrement bien adaptées à l'auscultation de l'état de surface.

Nous avons choisi d'utiliser ces ondes pour la détection et la caractérisation des fissures débouchant en surface. Nous avons ainsi développé une méthode d'évaluation de la profondeur de pénétration de ces fissures. Cette méthode repose sur l'analyse spectrale des ondes de Rayleigh.

Le travail de recherche s'est orienté selon deux axes : d'une part la modélisation numérique de la propagation des ondes sur des géométries de fissure de surface et d'autre part la réalisation d'essais sur modèles expérimentaux en béton.

Pour la modélisation numérique, nous avons adapté des codes issus de la recherche géophysique utilisant la méthode indirecte d'éléments de frontière (IBEM, pour Indirect Boundary Elements Method). Cet outil est bien adapté à l'étude de notre problème. Il nous a permis une analyse fine des différents phénomènes liés à la

diffraction d'une onde de Rayleigh pour une géométrie de fissure de surface. Les sismogrammes synthétiques issus de cette modélisation sont un support précieux pour le développement de méthodes d'auscultation. Des tests ont ainsi pu être réalisés de façon théorique avant une application expérimentale.

En parallèle des développements numériques, une dalle expérimentale en béton a été construite. Des fissures artificielles de différentes profondeurs y ont été insérées par sciage. Ce site a permis de tester le matériel expérimental et de mettre au point les techniques d'acquisition et de traitement des données. Les signaux expérimentaux obtenus sur ce site sont très bruités, leur analyse temporelle s'avère très délicate. Les informations qu'ils contiennent sont plus facilement exploitables dans le domaine spectral.

Ces deux axes de recherche ont permis l'élaboration d'une méthode d'évaluation de la profondeur de pénétration des fissures de surface. Le principe de cette méthode repose sur le phénomène de filtrage fréquentiel des ondes de Rayleigh par la fissure. Ce phénomène, établi à partir des données numériques, a été vérifié expérimentalement. Nous avons ainsi pu obtenir la profondeur de pénétration des fissures artificielles avec une précision de l'ordre de 15 à 20% pour des fissures de profondeur supérieure à 5 cm. Dans le cas de fissures moins profondes, la méthode est mise en défaut. Cela peut être dû à l'importance de la diffraction de l'énergie pour les fréquences concernées et à la mauvaise qualité de la réponse des capteurs pour ces fréquences.

Une autre méthode basée sur l'analyse temporelle des ondes P a été testée sur le site expérimental. Cette méthode donne des résultats similaires sur les fissures artificielles. Elle nécessite une mise en oeuvre expérimentale quasiment identique à celle de la méthode spectrale. Leur utilisation simultanée permet une double évaluation de la profondeur des fissures pour un faible surcoût expérimental. Ces deux méthodes ont été testées en parallèle sur différents cas de fissuration artificielle et sur un cas de fissure réelle.

Nous avons étudié le problème de la présence de l'eau dans les fissures. Il s'avère que l'énergie des ondes P et les ondes de Rayleigh n'est pratiquement pas

transmise à travers une fissure remplie d'eau. Cela ne perturbe donc pas l'évaluation de la profondeur de la fissure.

Dans le cas d'un contact entre les deux bords de la fissure, les deux méthodes peuvent donner des résultats différents. Une analyse numérique détaillée a permis d'établir le rôle d'un contact dans la transmission de l'énergie d'une onde de Rayleigh suivant sa taille. L'auscultation expérimentale d'une fissure avec un contact en ciment à une profondeur intermédiaire a permis de confirmer la complémentarité des deux méthodes. En effet, la profondeur totale de la fissure a été établie par la méthode spectrale, celle du contact par la méthode temporelle. De ce cas particulier et de l'étude numérique, on peut établir que si la profondeur évaluée par la méthode spectrale est supérieure à celle évaluée par la méthode temporelle, trois conclusions s'imposent :

- 1) la profondeur établie par la méthode temporelle indique celle du premier contact,
- 2) la fissure se prolonge sous ce contact,
- 3) sa profondeur totale est au moins supérieure à la valeur établie par la méthode spectrale.

Ces deux méthodes ont été appliquées à l'auscultation d'une fissure réelle sur un ouvrage d'art. Sur un des deux points de mesure, les deux méthodes donnent des valeurs de profondeur cohérentes (17 cm), sur le second la profondeur d'un premier contact a été établie par la méthode temporelle à 8 cm, la méthode spectrale indique que la fissure se prolonge sous ce contact au moins jusqu'à 21,7 cm. L'utilisation des deux méthodes en parallèle apporte une amélioration certaine pour l'auscultation de fissures réelles.

Cette étude montre donc que l'analyse du comportement des ondes de Rayleigh fournit une information pertinente sur les fissures de surface. Cela est vérifié expérimentalement sur le béton. Cette information peut compléter efficacement celles fournies par la méthode temporelle classique et ce pour un faible surcoût de mise en oeuvre expérimentale.

Diverses recherches s'avèrent néanmoins nécessaires pour compléter ce travail et améliorer la méthode, du point de vue théorique comme du point de vue expérimental. On pourra notamment remarquer que différents points n'ont pas été explorés en détail : l'influence de la position des capteurs par rapport à la fissure, la différence dans les courbes de rapport de spectre pour une fissure avec un petit contact et pour une fissure moins profonde mais sans contact, l'influence de l'épaisseur des fissures réelles,... Différentes procédures de la méthode peuvent également être améliorées. Du point de vue expérimental, de nombreuses adaptations faciliteraient la mise en oeuvre de la méthode. Un système de source instrumentée pourrait être étudié pour émettre un signal répétitif, avec l'énergie dans une bande de fréquence adaptée et contrôlée, et fonctionner sur toutes les surfaces quelle que soit leur orientation (verticale, horizontale, surplomb,...). Un système d'acquisition multicapteurs incluant certaines procédures simples de traitement de données (sommations, filtrage,...) serait une amélioration réelle pour la mise en oeuvre de la méthode, une analyse préliminaire in situ serait alors possible, ce qui permettrait d'adapter la procédure expérimentale à chaque auscultation.

Des extensions de cette étude à des cas particuliers de fissuration sont également envisageables : applications de l'auscultation à des fissures inclinées par rapport à la surface, détection de défauts non débouchants... Des études en trois dimensions seraient également une amélioration intéressante pour la caractérisation de fissures avec des contacts ponctuels.

Ces résultats et perspectives sont encourageants pour le développement de l'utilisation des ondes de Rayleigh pour le contrôle non destructif des structures en génie civil. De nombreuses applications sont envisageables, elles répondraient à une demande croissante des professionnels dans ce domaine.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Liste alphabétique

- Aki K., Richards P.G., 1980.** *Quantitative seismology*, W.H. Freeman, San Francisco.
- Al Hunaidi M.O., 1994.** *Analysis of dispersed multi-mode signals of SASW method using the multiple filter/crosscorrelation technique*, Journal of Soil Dynamics and Earthquake engineering, Vol. 13, n°1, pp 13-24.
- Al Hunaidi M.O., 1997.** *Evolution-based genetic algorithms for optimisation of nondestructive surface waves tests on pavements*, Proc. of NDT CE'97 conf., pp729-742
- Bay J.A., Stokoe II K.H., 1992.** *Field and laboratory determination of elastic properties of portland cement concrete using seismic techniques*, Transportation research record 1355, pp 67-74.
- Bowen B.R., Roesset J.M., Stokoe II K.H., 1981.** *Integrity testing of concrete elements using surface waves*, Proceedings of Engineering Mechanics, Publ. by ASCE, New York, USA, pp 925-955
- Bréjean S., 1998.** Rapport de stage de maîtrise science de la terre, LCPC , Nantes.
- British Standard, 1986.** *Recommendations for measurment of velocity of ultrasonic pulses in concrete*, Testing concrete, BS 1881 : Part 203 : 1986.
- Bulletin de Liaison des Laboratoire Routier, 1968.** Utilisation du vibreur Goodman en auscultation des chaussées, LCPC, ministère de l'équipement et du logement.
- Burger C.P., Testa A., 1981.** *Rayleigh wave spectroscopy to measure the depth of surface cracks*, Proceedings of the thirteenth symposium on non destructive evaluation, San Antonio TX, April 21-23.
- Caprioli P., 1991.** *Auscultation structurale des sols et des chaussées routières à partir de la propagation d'ondes mécaniques totalement ou partiellement guidées*, Thèse de l'Université Louis Pasteur (Strasbourg I).
- Cara M., 1978.** *Etude du manteau supérieur à partir des harmoniques des ondes de surface*, Thèse de l'Université Pierre et Marie Curie (Paris IV).
- Cooper J.A., Crosbie R.A., Dewhurst R.J., McKie A.D.W., Palmer S.B., 1986.** *Surface acoustic wave interactions with cracks and slots : a noncontacting study using lasers*, IEEE Transactions on ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency control, Vol. UFFC-33, n°5, pp 462-470.

- Côte Ph., 1988. *Tomographie sismique appliquée au génie civil*, Thèse d'état. Université Joseph Fourier (Grenoble I).
- Dhatt G., Touzot G., 1984. *Une présentation de la méthode des éléments finis*, 2nd éd., Maloine S.A. Ed., Paris.
- Ditchburn R.J., Burke S.K., Scala C.M., 1996. *NDT of welds : state of the art*, NDT&E International, Vol. 29, No. 2, pp. 111-117.
- Dreux G., Festa J., 1995. *Nouveau guide du béton*. Ed. Eyrolles. Paris.
- Dziewonski A.M., Hales A.L., 1972. *Numerical Analysis of dispersed seismic waves*, Methods in computational physics, vol. 11, pp 39-85.
- Ewing W.M., Jardetsky W.S., Press F., 1957. *Elastic waves in layered media*, McGraw-Hill Book company, New York.
- Ewins D.J., 1984. *Modal Testing : Theory and Practice*, Research Studies Press Ltd, Somerset.
- Fuyuki M., Matsumoto Y., 1980. *Finite difference analysis of Rayleigh wave scattering at a trench*, Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 70, n°6, pp 2051-2069.
- Ganji V., Gucunski N., Malher A., 1997. Detection of underground obstacle by SASW method - numerical aspects. Jr. Geotechnical and geoenvironmental engineering, Vol. 123, No. 3, pp212-219.
- Guillemin R., Gramsamer J.C., 1971. *Auscultation dynamique des chaussées à l'aide du vibreur léger*, Note d'info. technique, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- Haskell N. A., 1953. *The dispersion of surface waves on multilayered media*, Bulletin of Seismological Society of America., Vol.43, pp 17-34
- Heisey J.S., Stokoe II K.H., Hudson W.R., Meyer A.H., 1982. *Determination of in situ shear wave velocities from Spectral Analysis of Surface Waves*, Research report 256-2, Center for transportation research, the University of Texas at Austin.
- Imram I., Nazarian S., Picornell M., 1995. *Crack detection using time domain wave propagation technique*, Jr. Geotech. Eng., Vol 121, n°2, pp 198-207.
- Jongmans D., Campillo M., Demanet D., 1990. *The use of surface wave inversion and seismic reflection methods for engineering applications*, Proceedings of the sixth Congress of the International Association of Engineering Geology, pp 10, Amsterdam.

- Jongmans D., Demanet D., Horrent C., Campillo M., Sanchez-Sesma F.J., 1996. *Dynamic soil parameter determination by geophysical prospecting in Mexico City : implication for site effect modelling*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 15, pp 549-559.
- Kahan M. 1993. *Non destructive structure evaluation : an application of seismic signal analysis*. Master of science, Massachusetts Institute of Technology.
- Kalinski M.E., Stokoe II K.H., Jirsa J.O., Roesset J.M., 1994. *Non destructive identification of internally damaged areas of concrete beam using the Spectral Analysis of Surface Waves method*. Transportation research record 1458, pp14-19.
- Kelly, K.R. and Marfurt, K.J., 1990. *Numerical modeling of seismic wave propagation* (Geophysics Reprint series, N°13.) Soc .Explor. Geophys., Tulsa, Okla., USA
- Klein R., Antes H., Le Houedec D., 1997. *Efficient 3D modelling of vibration isolation by open trenches*, Computer & Structures, Vol. 64, n°1-4, pp 809-817.
- Knopoff L., 1983. *The thickness of the lithosphere from the dispersion of surface waves*, Geophys. J. R. astr. Soc., Vol 74, pp 55-81.
- Le Houedec D., Picard J., 1989. *Analyse de la réduction de la propagation des vibrations dans le sol au moyen de tranchées ou d'écrans*. Colloque Nat. AFPS, St-Remy-lès-Chevreuse (France), Avril 89.
- Liu S.-W., Sung, J.-C., Chang C.-S., 1997. *Transient scattering of SH waves by surface breaking and sub-surface cracks*, Int. J; Solids Structures, vol. 34, No. 30, pp 4019-4035
- Matthews M.C., Hope V.S., Clayton C.R.I., 1996. *The use of surface waves in the determination of ground stiffness profiles*, Proceedings of Instn Civ. Engrs Geotech. Engng, 119, Apr., pp 84-95.
- Miller G.F., Pursey H., 1955. *On the partition of energy between elastic waves in a semi-infinite solid*, Proceedings of the Royal Society of London, Vol. 223, pp 55-69.
- Nazarian S., Stokoe II K.H., 1985. *In situ determination of elastic moduli of pavements systems by Spectral Analysis of Surface Waves method : practical aspects*, Research report 368-1F, Center for transportation research, the University of Texas at Austin.
- Nazarian S., Stokoe II K.H., 1986. *In situ determination of elastic moduli of pavements systems by Spectral Analysis of Surface Waves method : theoretical aspects*, Research report 437-2, Center for transportation research, the University of Texas at Austin.

Norme Française NF P 95-103, 1993. *Ouvrage d'art - Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie - traitement des fissures et protection du béton - Spécifications relatives à la technique et aux matériaux utilisés*, AFNOR, pp 26.

Parasnis D.S., 1986. *Principles of applied geophysics*, fourth edition, Sciences paperbacks, London.

Pedersen H.A., Sanchez-Sesma F.J., Campillo M., 1994. *Three-dimensional scattering by two-dimensional topographies*, Bull. Seism. Soc. Am. Vol 84, pp 1169-1183.

Pedersen H.A., Le Brun B., Hatzfeld D., Campillo M., Bard P.-Y., 1994. *Ground-motion amplitude across ridges*. Bull. Seism. Soc. Am., Vol 84, No 6, pp 1786-1800.

Pedersen H.A., 1994. *Etude de la diffraction tridimensionnelle des ondes sismiques dans des structures à géométrie bidimensionnelle. Développement théorique et applications*. Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier - Grenoble I.

Perdijon J., 1993. *Le contrôle non destructif par ultrasons*, Traité des nouvelles technologies - Série matériaux

Rayleigh Lord J.W.S., 1887. *On waves propagated along the plane surface of an elastic solid*, Proceedings of the London Mathematical Society, vol. 17, pp 4 - 11.

Richart F.E., Hall J.R., Woods R.D., 1970. *Vibrations of soils and foundations* (Prentice Hall), Englewood Cliffs, New Jersey.

Rix G.J., Stokoe II K.H., Roesset J.M., 1991. *Experimental study of factors affecting the SASW method*, Research report 1123-5, Center for transportation research, the University of Texas at Austin.

Sanchez-Sesma F.J., Campillo M., 1991. *Diffraction of P,SV and Rayleigh waves by topographic features : boundary integral formulation*. Bull. of Seism. Soc. of Am., Vol 81, No 6, pp 2234-2253.

Sanchez-Sesma F.J., Campillo M., 1993. *Topographics effects for incident P, SV and Rayleigh waves*, Tectonophysics, 218, pp 113-125.

Segol G., Lee P.C.Y., Abel J.F., 1978. *Amplitude reduction of surface waves by trenches*, Journal of the engineering mechanics division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, vol. 104, n°EM3, pp 621-641.

Serridge M., Licht T.R., 1988. *Accéléromètres piézo-électriques et préamplificateurs de vibration*. Brüel et Kjaer.

Silk M.G., 1976. *The determination of crack penetration using ultrasonic surface waves*, Ultrasonics, NDT Int. December 1976, pp 290-297.

Smith R.L., Crook M.J., 1989. *The non destructive detection and mapping of ASR cracking in concrete*, Transport and road research laboratory, 38 pp.

Tarantola A., Valette B., 1982. *Inverse problems : quest of informations*, J. Geoph., vol. 50, pp 159-170.

Tittmann B.R., Cohen-Tenoudji F., de Billy M., Jungman A., Quentin G., 1978. *A simple approach to estimate the size of small cracks with the use of acoustic surfaces waves*, Appl. Phys. Lett., Vol 33, n°1, pp 6-8.

Tokimatsu K., Tamura S., Kojima H., 1992. *Effect of multiple modes on Rayleigh wave dispersion characteristics*, Journal of Geotechnical Engineering, vol. 118, n°10, pp 1529-1543.

Trifunac, M.D., 1973. *Scattering of plane SH waves by semicylindrical canyon*. Int. J. Earthquake Eng. Struct. Dyn., 1: 267-281.

Yuan D., Nazarian S., 1993. *Automated surface wave method inversion technique*, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 119, n°7, pp 1112-1127.

Woods R.D., 1968. *Screening of surface waves in soils*, Journal of the Soil Mechanics and Foundations division, ASCE, vol. 94, n°SM4, Proc. 6031, july 68, pp 951-979.

Références bibliographiques Liste thématique

1. ONDE DE SURFACE - GEOPHYSIQUE

- Aki K., Richards P.G., 1980. *Quantitative seismology*, W.H. Freeman, San Francisco.
- Cara M., 1978. *Etude du manteau supérieur à partir des harmoniques des ondes de surface*, Thèse de l'Université Pierre et Marie Curie (Paris IV).
- Dziewonski A.M., Hales A.L., 1972. *Numerical Analysis of dispersed seismic waves*, Methods in computational physics, vol. 11, pp 39-85.
- Ewing W.M., Jardetsky W.S., Press F., 1957. *Elastic waves in layered media*, McGraw-Hill Book compagny, New York.
- Haskell N. A., 1953. *The dispersion of surface waves on multilayered media*, Bulletin of Seismological Society of America., Vol.43, pp 17-34
- Jongmans D., Demanet D., Horrent C., Campillo M., Sanchez-Sesma F.J., 1996. *Dynamic soil parameter determination by geophysical prospecting in Mexico City : implication for site effect modelling*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 15, pp 549-559.
- Knopoff L., 1983. *The thickness of the lithosphere from the dispersion of surface waves*, Geophys. J. R. astr. Soc., Vol 74, pp 55-81.
- Miller G.F., Pursey H., 1955. *On the partition of energy between elastic waves in a semi-infinite solid*, Proceedings of the Royal Society of London, Vol. 223, pp 55-69.
- Parasnis D.S., 1986. *Principles of applied geophysics*, fourth edition, Sciences paperbacks, London.
- Rayleigh Lord J.W.S., 1887. *On waves propagated along the plane surface of an elastic solid*, Proceedings of the London Mathematical Society, vol. 17, pp 4 - 11.
- Richart F.E., Hall J.R., Woods R.D., 1970. *Vibrations of soils and foundations (Prentice Hall)*, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Tarantola A., Valette B., 1982. *Inverse problems : quest of informations*, J. Geoph., vol. 50, pp 159-170.

Tokimatsu K., Tamura S., Kojima H., 1992. *Effect of multiple modes on Rayleigh wave dispersion characteristics*, Journal of Geotechnical Engineering, vol. 118, n°10, pp 1529-1543.

Woods R.D., 1968. *Screening of surface waves in soils*, Journal of the Soil Mechanics and Foundations division, ASCE, vol. 94, n°SM4, Proc. 6031, July 68, pp 951-979.

2. MODELISATION NUMERIQUE

Dhatt G., Touzot G., 1984. *Une présentation de la méthode des éléments finis*, 2nd éd., Maloine S.A. Ed., Paris.

Fuyuki M., Matsumoto Y., 1980. *Finite difference analysis of Rayleigh wave scattering at a trench*, Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 70, n°6, pp 2051-2069.

Ganji V., Gucunski N., Malher A., 1997. Detection of underground obstacle by SASW method - numerical aspects. Jr. Geotechnical and geoenvironmental engineering, Vol. 123, No. 3, pp212-219.

Kelly, K.R. and Marfurt, K.J., 1990. *Numerical modeling of seismic wave propagation* (Geophysics Reprint series, N°13.) Soc. Explor. Geophys., Tulsa, Okla., USA

Klein R., Antes H., Le Houedec D., 1997. *Efficient 3D modelling of vibration isolation by open trenches*, Computer & Structures, Vol. 64, n°1-4, pp 809-817.

Liu S.-W., Sung, J.-C., Chang C.-S., 1997. *Transient scattering of SH waves by surface breaking and sub-surface cracks*, Int. J. Solids Structures, vol. 34, No. 30, pp 4019-4035

Pedersen H.A., Sanchez-Sesma F.J., Campillo M., 1994. *Three-dimensional scattering by two-dimensional topographies*, Bull. Seism. Soc. Am. Vol 84, pp 1169-1183.

Pedersen H.A., Le Brun B., Hatzfeld D., Campillo M., Bard P.-Y., 1994. *Ground-motion amplitude across ridges*. Bull. Seism. Soc. Am., Vol 84, No 6, pp 1786-1800.

Pedersen H.A., 1994. *Etude de la diffraction tridimensionnelle des ondes sismiques dans des structures à géométrie bidimensionnelle. Développement théorique et applications*. Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier - Grenoble I.

Sanchez-Sesma F.J., Campillo, M., 1991. *Diffraction of P,SV and Rayleigh waves by topographic features : boundary integral formulation*. Bull. of Seism. Soc. of Am., Vol 81, No 6, pp 2234-2253.

Sanchez-Sesma F.J., Campillo M., 1993. *Topographic effects for incident P, SV and Rayleigh waves*, Tectonophysics, 218, pp 113-125.

Segol G., Lee P.C.Y., Abel J.F., 1978. *Amplitude reduction of surface waves by trenches*, Journal of the engineering mechanics division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, vol. 104, n°EM3, pp 621-641.

Trifunac, M.D., 1973. *Scattering of plane SH waves by semicylindrical canyon*. Int. J. Earthquake Eng. Struct. Dyn., 1: 267-281.

3. CONTROLE NON DESTRUCTIF

3.1. Matériau

Burger C.P., Testa A., 1981. *Rayleigh wave spectroscopy to measure the depth of surface cracks*, Proceedings of the thirteenth symposium on non destructive evaluation, San Antonio TX, April 21-23.

Cooper J.A., Crosbie R.A., Dewhurst R.J., McKie A.D.W., Palmer S.B., 1986. *Surface acoustic wave interactions with cracks and slots : a noncontacting study using lasers*, IEEE Transactions on ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency control, Vol. UFFC-33, n°5, pp 462-470.

Ditchburn R.J., Burke S.K., Scala C.M., 1996. *NDT of welds : state of the art*, NDT&E International, Vol. 29, No. 2, pp. 111-117.

Imram I., Nazarian S., Picornell M., 1995. *Crack detection using time domain wave propagation technique*, Jr. Geotech. Eng., Vol 121, n°2, pp 198-207.

Perdijon J., 1993. *Le contrôle non destructif par ultrasons*, Traité des nouvelles technologies - Série matériaux

Silk M.G., 1976. *The determination of crack penetration using ultrasonic surface waves*, Ultrasonics, NDT Int. December 1976, pp 290-297.

Tittmann B.R., Cohen-Tenoudji F., de Billy M., Jungman A., Quentin G., 1978. *A simple approach to estimate the size of small cracks with the use of acoustic surfaces waves*, Appl. Phys. Lett., Vol 33, n°1, pp 6-8.

3.2. Génie civil

Al Hunaidi M.O., 1994. *Analysis of dispersed multi-mode signals of SASW method using the multiple filter/crosscorrelation technique*, Journal of Soil Dynamics and Earthquake engineering, Vol. 13, n°1, pp 13-24.

Al Hunaidi M.O., 1997. *Evolution-based genetic algorithms for optimisation of nondestructive surface waves tests on pavements*, Proc. of NDT CE'97 conf., pp729-742

- Bay J.A., Stokoe II K.H., 1992. *Field and laboratory determination of elastic properties of portland cement concrete using seismic techniques*, Transportation research record 1355, pp 67-74.
- Bowen B.R., Roesset J.M., Stokoe II K.H., 1981. *Integrity testing of concrete elements using surface waves*, Proceedings of Engineering Mechanics, Publ. by ASCE, New York, USA, pp 925-955
- Bréjean S., 1998. Rapport de stage de maîtrise science de la terre, LCPC, Nantes.
- British Standard, 1986. *Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete*, Testing concrete, BS 1881 : Part 203 : 1986.
- Bulletin de Liaison des Laboratoire Routier, 1968. Utilisation du vibreur Goodman en auscultation des chaussées, LCPC, ministère de l'équipement et du logement.
- Caprioli P., 1991. *Auscultation structurale des sols et des chaussées routières à partir de la propagation d'ondes mécaniques totalement ou partiellement guidées*, Thèse de l'Université Louis Pasteur (Strasbourg I).
- Côte Ph., 1988. *Tomographie sismique appliquée au génie civil*, Thèse d'état. Université Joseph Fourier (Grenoble I).
- Fuyuki M., Matsumoto Y., 1980. *Finite difference analysis of Rayleigh wave scattering at a trench*, Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 70, n°6, pp 2051-2069.
- Ganji V., Gucunski N., Malher A., 1997. *Detection of underground obstacle by SASW method - numerical aspects*. Jr. Geotechnical and geoenvironmental engineering, Vol. 123, No. 3, pp212-219.
- Guillemin R., Gramsammer J.C., 1971. *Auscultation dynamique des chaussées à l'aide du vibreur léger*, Note d'info. technique, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- Heisey J.S., Stokoe II K.H., Hudson W.R., Meyer A.H., 1982. *Determination of in situ shear wave velocities from Spectral Analysis of Surface Waves*, Research report 256-2, Center for transportation research, the University of Texas at Austin.
- Jongmans D., Campillo M., Demanet D., 1990. *The use of surface wave inversion and seismic reflection methods for engineering applications*, Proceedings of the sixth Congress of the International Association of Engineering Geology, pp 10, Amsterdam.
- Jongmans D., Demanet D., Horrent C., Campillo M., Sanchez-Sesma F.J., 1996. *Dynamic soil parameter determination by geophysical prospecting in Mexico City : implication for site effect modelling*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 15, pp 549-559.

- Kahan M. 1993. *Non destructive structure evaluation : an application of seismic signal analysis*. Master of science, Massachusetts Institute of Technology.
- Kalinski M.E., Stokoe II K.H., Jirsa J.O., Roesset J.M., 1994. *Non destructive identification of internally damaged areas of concrete beam using the Spectral Analysis of Surface Waves method*. Transportation research record 1458, pp14-19.
- Klein R., Antes H., Le Houedec D., 1997. *Efficient 3D modelling of vibration isolation by open trenches*, Computer & Structures, Vol. 64, n°1-4, pp 809-817.
- Le Houedec D., Picard J., 1989. *Analyse de la réduction de la propagation des vibrations dans le sol au moyen de tranchées ou d'écrans*. Colloque Nat. AFPS, St-Remy-lès-Chevreuse (France), Avril 89.
- Matthews M.C., Hope V.S., Clayton C.R.I., 1996. *The use of surface waves in the determination of ground stiffness profiles*, Proceedings of Instn Civ. Engrs Geotech. Engng, 119, Apr., pp 84-95.
- Nazarian S., Stokoe II K.H., 1985. *In situ determination of elastic moduli of pavements systems by Spectral Analysis of Surface Waves method : practical aspects*, Research report 368-1F, Center for transportation research, the University of Texas at Austin.
- Nazarian S., Stokoe II K.H., 1986. *In situ determination of elastic moduli of pavements systems by Spectral Analysis of Surface Waves method : theoretical aspects*, Research report 437-2, Center for transportation research, the University of Texas at Austin.
- Rix G.J., Stokoe II K.H., Roesset J.M., 1991. *Experimental study of factors affecting the SASW method*, Research report 1123-5, Center for transportation research, the University of Texas at Austin.
- Segol G., Lee P.C.Y., Abel J.F., 1978. *Amplitude reduction of surface waves by trenches*, Journal of the engineering mechanics division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, vol. 104, n°EM3, pp 621-641.
- Smith R.L., Crook M.J., 1989. *The non destructive detection and mapping of ASR cracking in concrete*, Transport and road research laboratory, 38 pp.
- Tokimatsu K., Tamura S., Kojima H., 1992. *Effect of multiple modes on Rayleigh wave dispersion characteristics*, Journal of Geotechnical Engineering, vol. 118, n°10, pp 1529-1543.
- Yuan D., Nazarian S., 1993. *Automated surface wave method inversion technique*, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 119, n°7, pp 1112-1127.

4. DOCUMENTATION GENERALE

Dreux G., Festa J., 1995. *Nouveau guide du béton*. Ed. Eyrolles. Paris.

Ewins D.J., 1984. *Modal Testing : Theory and Practice*, Research Studies Press Ltd, Somerset.

Norme Française NF P 95-103, 1993. *Ouvrage d'art - Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie - traitement des fissures et protection du béton - Spécifications relatives à la technique et aux matériaux utilisés*, AFNOR, pp 26.

Serridge M., Licht T.R., 1988. *Accéléromètres piézo-électriques et préamplificateurs de vibration*. Brüel et Kjaer.

Annexe

Characterisation of surface cracks with Rayleigh waves: a numerical model

G. Hévin^{a,*}, O. Abraham^a, H. A. Pedersen^b, M. Campillo^b

^aLaboratoire Central des Ponts et Chaussées, Centre de Nantes, Bouguenais, France
^bLaboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique, Université Joseph Fourier, Grenoble, France

In the non-destructive testing of concrete structures, the use of Rayleigh waves shows some advantages to characterise surface cracks: easiness of excitation and recording, access to only one surface of the structure required, great spectral sensitivity to the propagation medium.... But the behaviour of Rayleigh waves on surface defects in concrete is difficult to perceive in the field, even if the dependence of the diffraction pattern on the crack's geometrical features is significant.

A numerical model is adapted from earth physics in order to better understand the influence of the crack geometry on Rayleigh-wave propagation. This model, based on an indirect boundary element method, calculates the three-dimensional seismic response of two-dimensional structures. Synthetic seismograms are obtained for the propagation of a Rayleigh wave across various crack geometries. The variations of spectral ratios between the transmitted and incident waves are studied as a function of the crack depth. They are used to design an efficient procedure for the determination of crack depths. © 1998 Elsevier Science Ltd. All rights reserved

Keywords: Rayleigh waves, surface cracks, concrete, IBEM

Introduction

All structures are submitted to weathering. As a consequence, civil engineers are faced with the problem of sounding buildings and evaluating the importance of alteration^[1-3]. One objective is to quantify damages that affect the mechanical behaviour of the whole structure. In this domain the detection and characterisation of surface cracks and faults are particularly important. Non-destructive techniques try to answer this question using different physical phenomena (optical diffraction, ultrasonics, electrical methods, radiographic inspection)^[4]. The use of surface waves seems to be a promising tool for studying concrete structures because this type of surface waves, and especially Rayleigh waves (R-waves), fulfil many non-destructive testing requirements.

When a R-wave propagates, the particle path is a retrograde ellipse in the vertical plan^[5]. The primary feature of R-waves, like other surface waves, is that the whole energy propagates near the free surface, parallel to it. Surface sources radiate high amounts of R-waves. Miller and Pursey^[6] evaluated that a point force in a homogeneous half-space radiates 67% of the energy as a Rayleigh wave while 26% is carried by the shear wave and 7% by the compression wave. Moreover, surface waves propagate radially along a circular wave front on the surface. Consequently, on the surface, the attenuation of this wave by geometrical spreading is smaller than that of body waves with their spherical wave front. Because of all these features, R-waves are particularly energetic and thus 'easy' to excite and to record. Another advantage is that the only necessary access is the surface under study.

The real interest of R-waves is their sensitivity to the medium in which they propagate. Their depth of propagation depends on the wavelength. Thus, for a medium with a

* Address for correspondence: G. Hévin, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Centre de Nantes, BP 19, F 44340 Bouguenais, France.

velocity varying with depth, the R-wave velocity depends on the frequency. This is the dispersion phenomenon. The dispersion and diffraction patterns of these waves can supply a lot of information on the propagation medium. The aim of this paper is to evaluate the ability of R-waves to fulfil the needs of civil engineers in the investigation of surface cracking. This study of R-waves leads us to suggest several tools in the experimental and numerical fields.

Rayleigh waves in the field

Seismologists were the first to work on R-waves. In exploration seismology, their interest was due to the fact that R-waves were considered as noise on seismic records (ground roll) which had to be removed to enhance the desired signal^[7]. Studies led geophysicists to better understand the behaviour of these waves. Indeed, the dispersion of R-waves makes it possible to determine seismic velocities for multilayered media^[5]. Good results have been obtained in soils on small and large scales and signal processing techniques keep improving^[5,8-11]. Knowledge of the earth's

geophysics provides a good basis for developing new non-destructive techniques.

In the non-destructive field, the detection and characterisation of surface cracks with R-waves was first widely developed for metallic materials with ultrasonics techniques^[4,12,13]. Previous studies provide several hypotheses on the diffraction patterns of R-waves on surface defects. To summarise, surface cracks can be viewed as reflectors, low-pass filters and delay gates. The diffraction pattern makes the study of cracks possible by the spectral analysis^[14] or the study of the arrival time of each wave train^[13,15] i.e., the reflected wave, the low frequency transmitted wave and the delayed transmitted wave (Figure 1).

Note also the work on the use of trenches for seismic wave isolation. To attenuate selected frequency bands, the effectiveness of such trenches depends strongly on the behaviour of the R-waves on these trenches and on their spectral analysis^[16,17].

All these studies provide a good basis to carry out experimental tests on a concrete slab to evaluate the adequacy of the diffraction theory to the small scale structures of civil engineering.

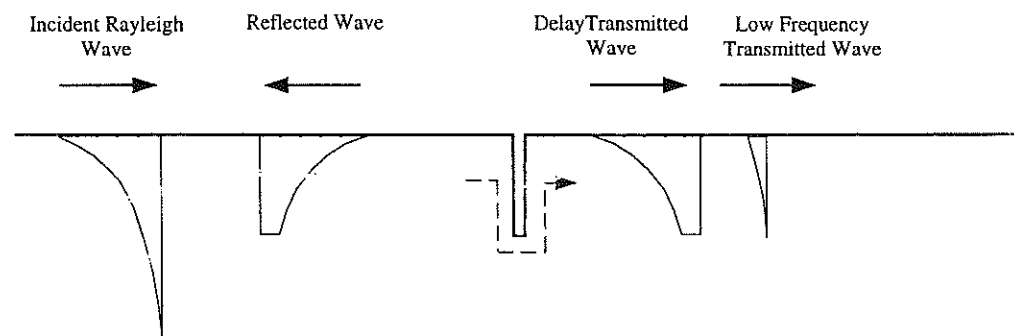


Figure 1 Interaction of a R-wave on a surface crack (from Ref. ^[13])

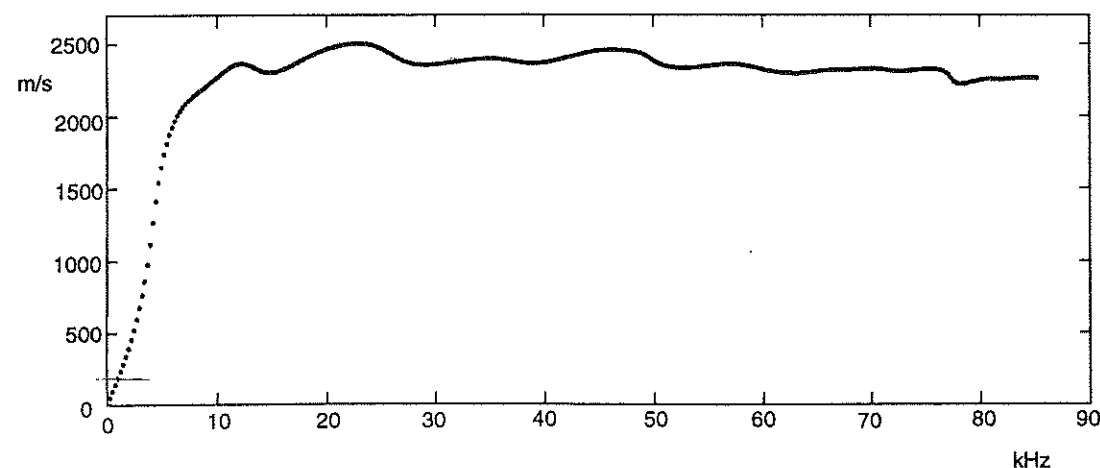


Figure 2 Dispersion curve obtained from the unwrapped phase by the SASW method on an homogeneous concrete slab

Experimental tests

In the first step, we determined the velocities of R-waves in a sound concrete slab of 4×4 m and thickness 0.4 m. Recordings were carried out with Brüel & Kjaer piezo-accelerometers n°4381 connected to a digital acquisition system. An impact on the surface of the slab, obtained with a steel ball controlled with an electromagnet, generated the R-waves. The Spectral Analysis of Surface Wave method^[9,18] was used to determine the dispersion curve (Figure 2). This method consists of measuring the phase shift between signals recorded at two different locations for the same impact. After unwrapping this phase shift and determining the distance between the two sensors, the phase velocity of the R-wave is evaluated for each frequency. As predicted, the phase velocity appears globally constant (around 2300 m s^{-1}) for the whole frequency band (from 5 to 80 kHz): the concrete slab is a non-dispersive medium for wavelengths from 2 to 40 cm.

In the second step, an artificial crack was introduced in the slab and a second set of measurements was carried out. These tests have revealed that experimental data are very noisy because concrete is a non-homogeneous medium so the noise produced by scattering from the microstructure is significant. Moreover, because the surface of the concrete slab is not perfectly flat, it is very difficult to get a repeatable source in amplitude. If several tests confirm the great sensitivity of R-waves to the presence of the crack, the accuracy is not sufficient to apply a time domain analysis as commonly undertaken in homogeneous media like metal^[13,15].

A better knowledge of the behaviour of R-waves on a surface crack appears necessary. To understand the scattering phenomena due to a crack, numerical simulations of wave propagation on such a geometry may provide the missing information for an accurate interpretation of the experimental tests.

Numerical model

Theoretical aspects

During the last two decades, numerical simulation methods of wave propagation have greatly improved. While analytical calculations make it possible to solve many simple problems, new numerical methods, with the development of computers, are nowadays very efficient for complex geometries. However, if two-dimensional wave fields have been numerically modelled by numerous authors^[19], numerical calculation for three-dimensional problems^[20] still requires a significant amount of computer memory and calculation time.

A collaboration between the Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique (Grenoble, France) and the Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Nantes, France) resulted in a program of numerical simulations in concrete structures with a code adapted from earth physics. This code

calculates the three-dimensional wave response of two-dimensional geometries by means of the Indirect Boundary Element Method (IBEM). IBEM is based on the representation theorem^[21]. From this theorem, the wave field in an elastic medium can be written as the superposition of the radiations from sources located on the interface of the model. The displacement field in an elastic domain V with a boundary S can be written as

$$u_i(x) = \int_S \psi_j(\xi) G_{ij}(x, \xi) dS_\xi \quad (1)$$

where $u_i(x)$ is the i th component of displacement at x , $G_{ij}(x, \xi)$ is the Green function, i.e., the displacement in direction i at x due to a point force in direction j applied at the point ξ and $\psi_j(\xi)$ is the force density in direction j at ξ . By convention, we will use in all these equations the sum on common subscripts. The integral representation makes computation of stresses and tractions possible by the application of Hooke's law. However, special care must be taken at boundary singularities (when $x = \xi$ on the boundary). By a limiting process based on equilibrium considerations around an internal neighbourhood of the boundary, it is possible to write for x on S that^[21]

$$t_i(x) = c\psi_i(x) + \int_S \psi_j(\xi) T_{ij}(x, \xi) dS_\xi \quad (2)$$

where $t_i(x)$ is the i th component of traction at x , c equals 0 if x is outside S , $1/2$ if x tends to S from the inside of V and $-1/2$ if x tends to S from the outside of V . $T_{ij}(x, \xi)$ is the traction Green function, i.e., the traction in direction i at x of a point source in direction j applied at the point ξ . T_{ij} is found by application of Hooke's law to Equation (1).

For the calculations the surface is discretized into N segments of length ΔS . Discrete expressions are used

$$u_i(x_n) = \sum_{k=1}^N \psi_j(\xi_k) g_{ij}(x_n, \xi_k) \quad (3)$$

$$t_i(x_n) = \sum_{k=1}^N \psi_j(\xi_k) g_{ij}(x_n, \xi_k) \quad (4)$$

with

$$g_{ij}(x_n, \xi_k) = \int_{\xi_k - \Delta S/2}^{\xi_k + \Delta S/2} G_{ij}(x_n, \xi) dS_\xi \quad (5)$$

$$t_{ij}(x_n, \xi_k) = \int_{\xi_k - \Delta S/2}^{\xi_k + \Delta S/2} (c\delta_{ij}\delta(x_n - \xi_k) + T_{ij}(x, \xi_k)) dS_\xi \quad (6)$$

The free field (u^0, t^0) is defined as the displacements and tractions due to incident waves without the irregularity. The ground motion is the superposition of the free field and the diffracted wave field that follows Equation (3). Thus, the

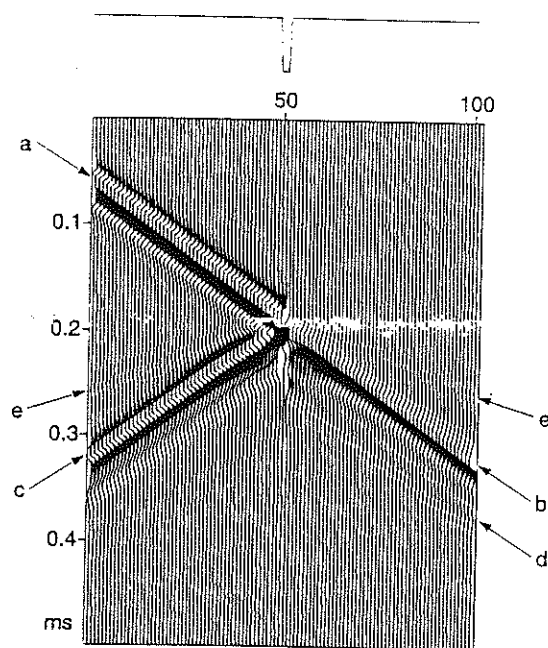


Figure 3 Synthetic seismograms (vertical component) for a crack of 5 cm depth: (a) incident R-wave (Ricker pulse); (b) direct transmitted R-wave; (c) reflected R-wave; (d) delayed transmitted R-wave; (e) body wave from conversion mode of R-wave

total displacements and tractions are

$$u_i(x_n) = u_i^0 + \sum_{k=1}^N \psi_j(\xi_k) g_{ij}(x_n, \xi_k) \quad (7)$$

$$t_i(x_n) = t_i^0 + \sum_{k=1}^N \psi_j(\xi_k) t_{ij}(x_n, \xi_k) \quad (8)$$

Three boundary conditions must be satisfied:

- (1) tractions equals 0 at free surfaces;

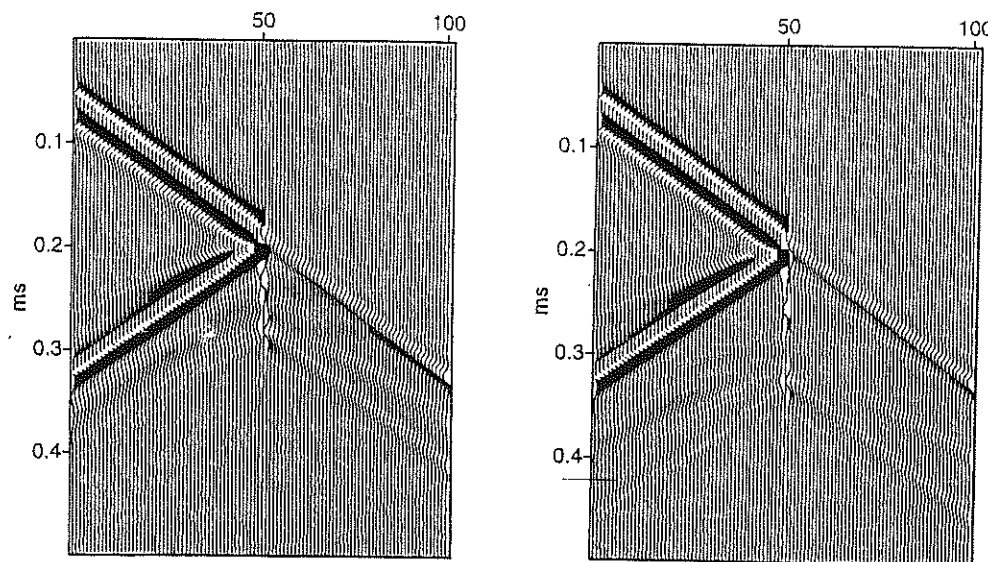


Figure 4 Same as Figure 3 with a 10-cm crack depth (left) and with a 15-cm crack depth (right)

- (2) displacements and tractions are continuous across interfaces;
- (3) the total field equals 0 at infinity. From condition 1, Equation (8) can be written as:

$$\sum_{k=1}^N \psi_j(\xi_k) t_{ij}(x_n, \xi_k) = -t_i^0(x_n) \quad n = 1, \dots, N \quad (9)$$

This linear system of equations is solved and displacements are calculated with Equation (7). IBEM uses compact expressions of the Green functions appropriate to this type of problem. A detailed discussion of this method and its applications in site effect simulations can be found in Refs [21,22]. Highly accurate results are produced at a low computational cost. The Green's function used makes it possible to consider waves upon the two-dimensional crack, so the diffracted wave-field is three-dimensional.

Calculations of synthetic seismograms for surface crack geometries

The calculations are performed for an incidence perpendicular to the crack. The program considers a half-space with a surface crack of infinite length (Figure 3). Its width is 5 mm and the depth takes different values: 5, 10 and 15 cm. The medium is characterised by Poisson's ratio of $\nu = 0.30$ and S-wave velocity of $\beta = 2500 \text{ m s}^{-1}$, as evaluated from experimental measures. The surface of the half space and the edges of the crack are free. Results are presented as synthetic seismograms (Figures 3 and 4). They show the response of 101 pseudo-displacement-sensors located along the profile. The incident R-wave is a Ricker pulse with a central frequency of 30 kHz.

For a 5-cm crack depth, three wave trains are clearly seen: the incident wave (Figure 3(a)), the direct transmitted wave (Figure 3(b)) and the reflected wave (Figure 3(c)). As the whole displacement field is calculated, conversion mode

from R-wave to body wave can be seen (Figure 3(e)), particularly as reflected waves (the body wave can be distinguished by its higher velocity). Note that a delayed R-wave is transmitted (Figure 3(d)), its time delay increasing with the crack depth (Figure 4). The time delay corresponds to the travel time of the R-wave (with a velocity of 2318 m s^{-1} calculated from V_s and ν) along twice the crack depth. Thus, this delayed transmitted wave is the wave which travels around the crack.

These results confirm and improve the diffraction pattern previously quoted from the ultrasonics techniques. We can identify each wave train of the model including the converted body waves. Moreover, these numerical results give information about the energy of the wave trains. Interestingly, the low energy of the delayed transmitted wave confirms that in the case of experimental signals, measuring the time delay would be difficult. Scattering from microstructures in a non-homogeneous medium produces noise which would cover this low energy wave. It appears difficult to work in the time domain to determine the crack depth.

A NDT method in the spectral domain

We propose here another way to obtain information about the crack depth. Synthetic seismograms have similar properties to the real ones as regards to their spectral content. Physically, the depth penetration of the R-wave depends on the frequency. For a surface crack, only low frequencies of the incident wave have significant energy below the crack and are therefore directly transmitted. From

the spectral analysis of this directly transmitted wave and of the incident wave, a 'cut-off' frequency can be determined which is linked to the crack depth.

In the seismograms, the displacement field due to the R-waves is the most energetic. Thus, in the spectrum of a signal, the spectral features of R-waves are dominant. The reflected wave contains a lot of energy relative to the transmitted wave (Figures 3 and 4). However, the reflected wave is theoretically composed of the high frequency content of the incident wave. The presence of the reflected wave on the signal recorded before the crack would therefore amplify the high frequency band in the spectrum of the incident wave. So the 'cut-off' frequency phenomenon is not disturbed by the reflected wave. To compare the spectral features of the direct transmitted wave and the incident wave, we calculated the spectral ratio of two records selected from each side of the crack.

The results calculated from synthetic seismograms in the case of a 9-cm depth crack is presented in Figure 5. This figure shows the mean of 50 curves calculated with different couples of sensors with the same distance from one to the other. In theory, the position of the sensors relative to the crack is of no influence. The mean curve starts at a value of around 1 and drops strongly at a frequency of $\approx 9 \text{ kHz}$ where it reaches a mean value of less than 0.5. For a velocity of 2318 m s^{-1} , the corresponding wavelength is about 26 cm. Because the maximum of a R-wave propagates at approximately 1/3 of the wavelength in depth, the crack depth can be evaluated at 8.6 cm (less than 5% errors compared to the actual value). Thus, this determination of a cut-off frequency gives a good evaluation of the crack depth.

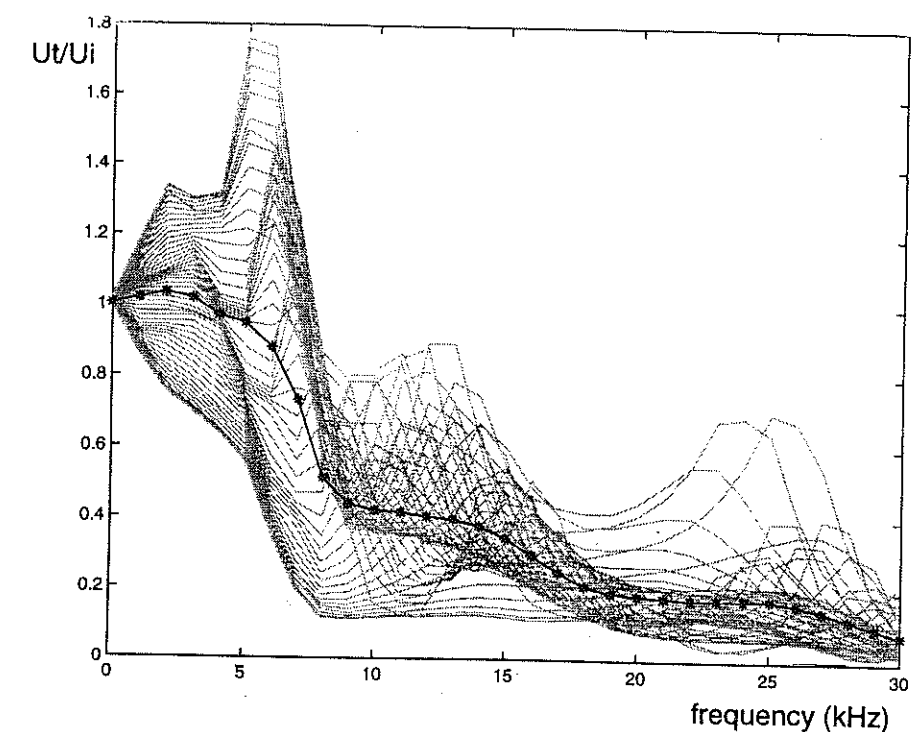


Figure 5 Mean curve of the spectral ratio of the transmitted wave on the incident wave in the case of synthetic signals

Experimental validation

Description of the experimental set-up

To validate this hypothesis, a new set of experimental tests was carried out. More sensors were used than for the previous tests and they were located at larger distances from the crack. The experimental site was a concrete slab of 6×4 m and a depth of 0.6 m without iron framework. On the surface of the slab, three artificial cracks were cut with a width of 5 mm and three different depth values: 4, 9 and 16 cm. Twelve sensors were placed on each side of the crack at steps of 10 cm. The source was the same as for the first tests and it was located at the boundary of the slab in order to be as far as possible from the first sensors and to avoid a first reflection on the boundary of the slab (Figure 6). We carried out the tests in two steps with five impacts on each side of the slab. Signals were stacked to improve the signal to noise ratio. They were then band filtered according to the theoretical response of the sensors and corrected for the geometrical spreading. The source location was reversed for each receiver location to get a double set of data. Figure 7 shows time domain signals and spectral amplitude of two signals after processing.

Spectral ratio evaluation process

To be able to compare the experimental and the numerical results, the spectral ratio of the transmitted wave on the incident wave must be calculated. A classical principle of calculation in geophysical signal processing was used which minimises the source effects and the influence of the different response functions of the sensors.

If A_{ij} is the amplitude in the spectral domain of a signal recorded from source i at receiver j , we can write a relation with U_{ij} , the absolute response function of the medium at location j and for a source at location i

$$A_{ij} = S_i \cdot U_{ij} \cdot R_j \quad (10)$$

where S_i is the i th source function and R_j is the response function of receiver j .

Following Equation (10), we can write (Figure 8):

$$A_{11} = S_1 \cdot U_{11} \cdot R_1 \quad (11)$$

$$A_{12} = S_1 \cdot U_{12} \cdot R_2 \quad (12)$$

$$A_{21} = S_2 \cdot U_{21} \cdot R_1 \quad (13)$$

$$A_{22} = S_2 \cdot U_{22} \cdot R_2 \quad (14)$$

We can calculate the amplitude ratio with

$$\frac{A_{12}}{A_{11}} \times \frac{A_{21}}{A_{22}} = \frac{S_1 \cdot U_{12} \cdot R_2}{S_1 \cdot U_{11} \cdot R_1} \times \frac{S_2 \cdot U_{21} \cdot R_1}{S_2 \cdot U_{22} \cdot R_2} = \frac{U_{12}}{U_{11}} \times \frac{U_{21}}{U_{22}} \quad (15)$$

identifying the common part of the path, we can write:

$$\frac{U_{12}}{U_{11}} = \frac{U_{21}}{U_{22}} \quad (16)$$

thus

$$\frac{A_{12}}{A_{11}} \times \frac{A_{21}}{A_{22}} = \left(\frac{U_{12}}{U_{11}} \right)^2 \quad (17)$$

and therefore

$$\frac{U_{12}}{U_{11}} = \sqrt{\frac{A_{12}}{A_{11}} \times \frac{A_{21}}{A_{22}}} \quad (18)$$

In this way, we have removed the source and receiver transfer functions. This process is applied to the data for each crack depth. In each case, 24 curves are calculated for different couples of sensors on each side of the crack. At the

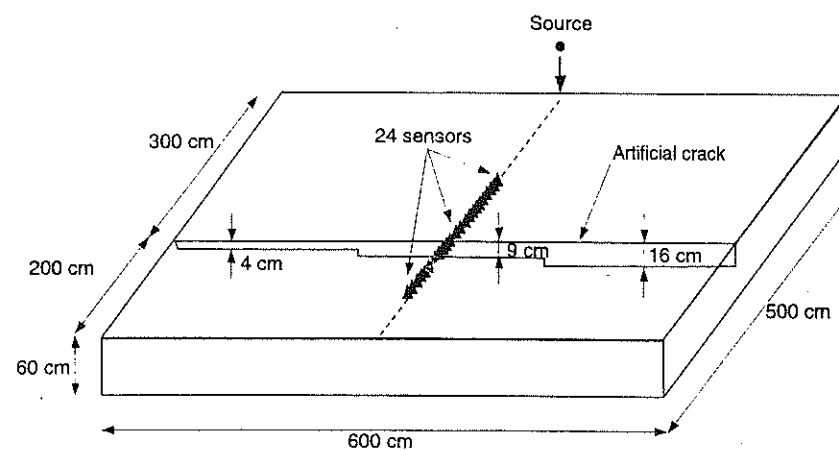


Figure 6 Schema of the experimental site with the localisation of the sensors and of the source in the case of the central crack with a depth of 9 cm

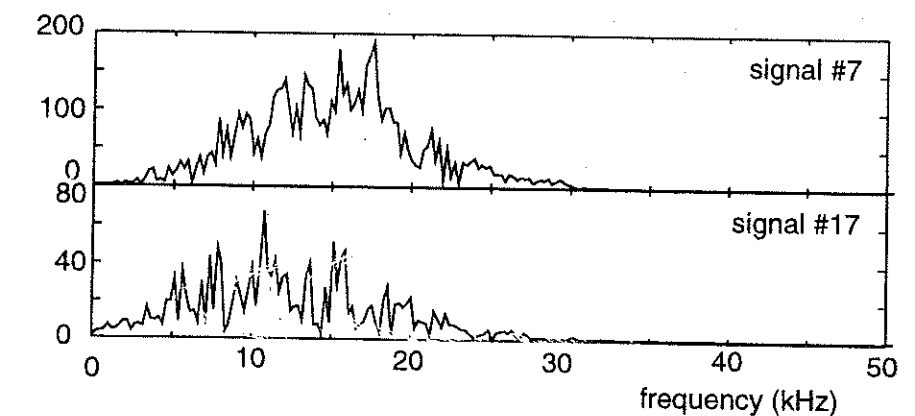
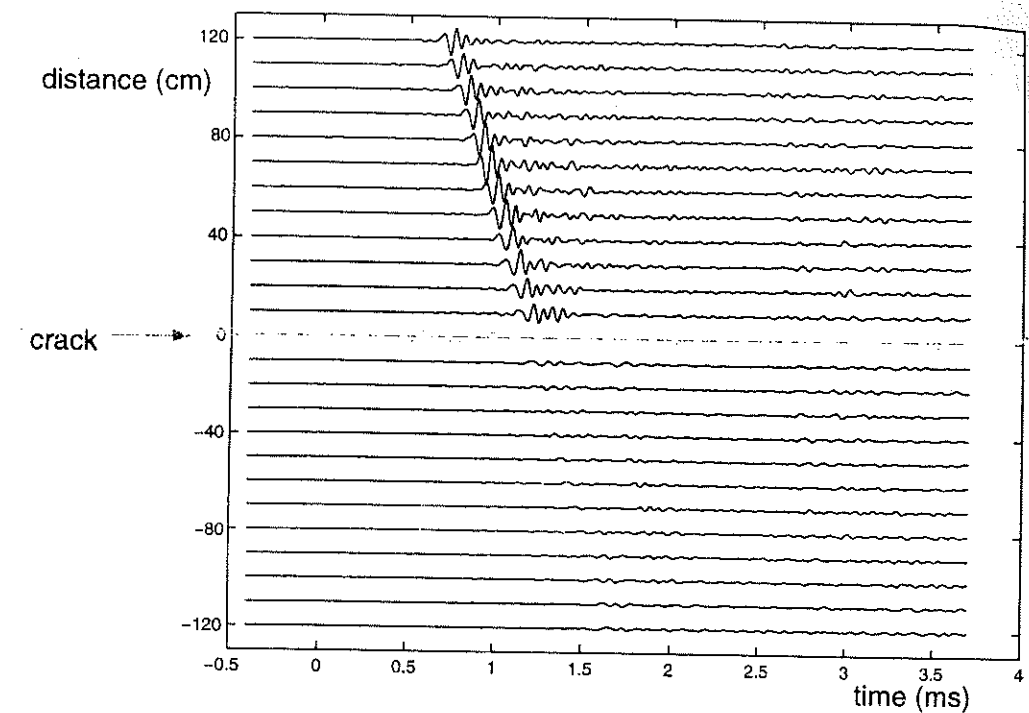


Figure 7 Experimental signals (top) obtained with the field conditions of Figure 6 and a representative example of spectra (bottom) of two signals recorded before (no. 7) and after (no. 17) the crack

end, the curves are smoothed to keep only the global aspect. The mean curves are presented in Figure 9. On the same figure, three curves calculated from our numerical model are presented.

Discussion

The first feature of this curves is the attenuation of the high frequencies. Each curve starts around 1 at 3 kHz. Below 3 kHz the experimental data cannot be taken into account: they correspond to wavelengths greater than the thickness of the slab and thus are influenced by the environmental medium. All the curves drop to values under 0.5. The decrease takes place at different frequencies depending on the crack depth. Notice that numerical and experimental curves follow the same trend, so the cut-off frequency phenomenon is verified experimentally.

A cut-off frequency can be determined as the frequency corresponding to the end of the decrease. We therefore picked three frequencies: 5.5, 9 and 17 kHz (Figure 9). These frequencies correspond to wavelengths of 42, 26 and

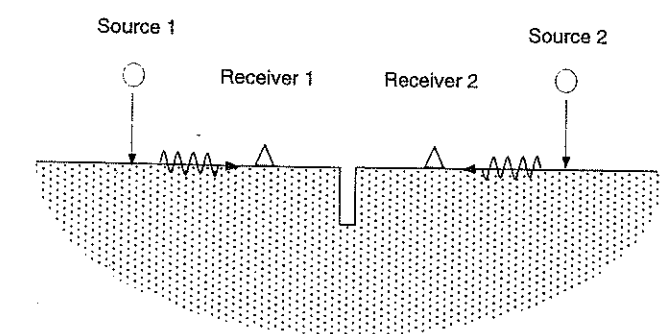


Figure 8 Schema of the reversed source location principle

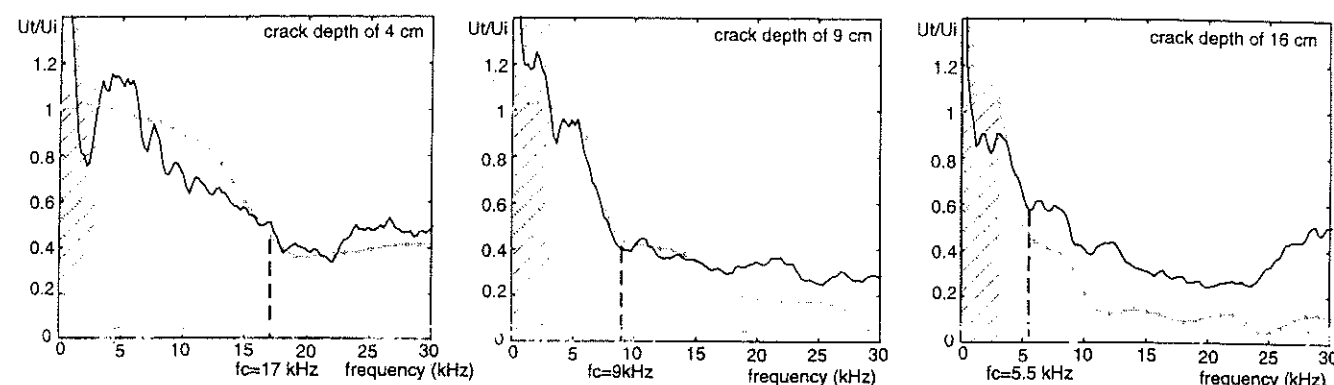


Figure 9 Spectral ratios of the transmitted on the incident waves for three different crack depths from experimental data (black curve) and numerical data (grey curves). The area of shadow on the left corresponds to wavelengths greater than the thickness of the slab

14 cm. The crack depths are therefore evaluated to be 14.0, 8.6 and 4.5 cm. The depths of the cracks found experimentally were within 15% of the actual sizes. The determination of experimental cut-off frequencies is not very accurate because the variations of the experimental curves are significant. However, the information supplied by the numerical curves makes it possible to confirm the trends of the experimental curves which helps to determine the cut-off frequencies. We are currently working to improve the accuracy of this method.

Another procedure could eventually be developed with these tools: the calculation of abacus. The numerical code makes it possible to calculate many models of a crack characterised by simple parameters such as the crack depth. Abacus could thus be established for possible crack depths and experimental curves could be adjusted to them. The evaluation of the crack depth could be greatly improved. But this hypothesis needs to be validated by more experimental work.

Conclusion and perspectives

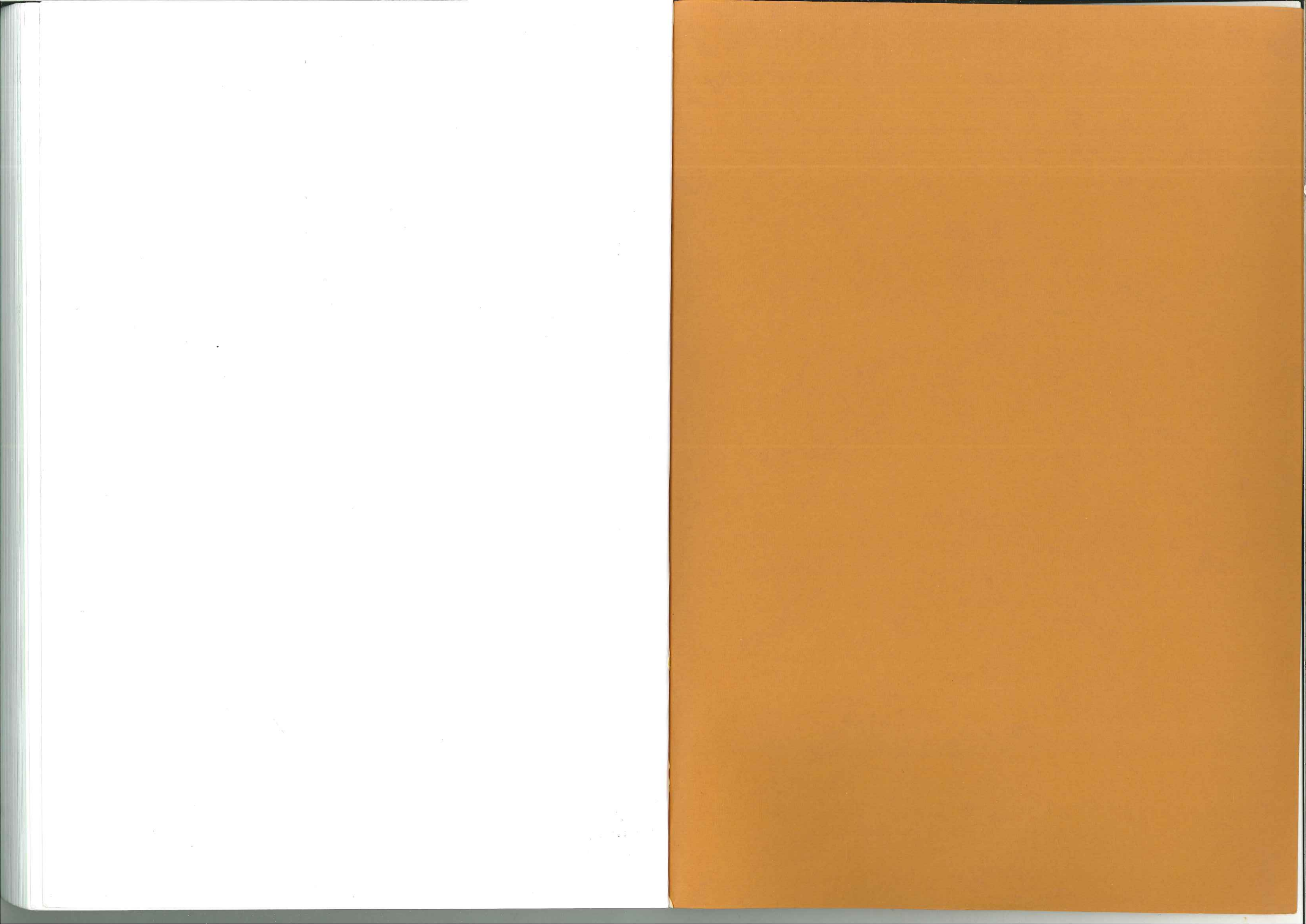
The problem of the detection and characterisation of surface cracks in structures is of paramount importance for civil engineers. Due to their great sensitivity to the propagation medium, R-waves seem to be a promising tool.

We studied a first application of this tool on an experimental site. It appears that the recorded signals were complex because of the non-homogeneity of the concrete. To improve our understanding of the behaviour of R-waves, a numerical simulation was developed. This model, adapted from an earth physic code, is based on an IBEM. It calculates the three-dimensional seismic response of two-dimensional structures. Synthetic signals were obtained for the propagation of a R-wave across various surface cracks. With these signals, a signal processing method to determine crack features, such as crack depth, is suggested. This method was verified in the field on artificial cracks in a concrete slab. Experimental and numerical results were in agreement. IBEM seems to be an efficient tool to study the diffraction of R-waves. It enabled us to design a reliable experimental procedure and can be used to improve the crack depth evaluation.

Future perspectives are to broaden the method to the case of more realistic cracks (water-filled cracks, cracks with mechanical contact between the two lips, ...). The objective is to quantify the real ability of the R-waves for the non-destructive testing of surface cracks in concrete structures.

References

- Sack, D. A., Olson, L. D. and Phelps, G. C. Innovations for NDT of concrete structures: performance and prevention of deficiencies and failures. In *Mater. Eng. Congr.*, ASCE, New York, pp 519-531, 1992.
- Shah, S. and Landis, E. Applications of NDT to basic and applied concrete research. In *Proceedings of International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, Vol. 1, pp. 31-38, 1995.
- Büyükoztürk, O. Imaging of concrete structures. In *Proceedings of International Conference on Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, Vol. 1, pp. 31-52, 1997.
- Ditchburn, R. J., Burke, S. K. and Scala, C. M. NDT of welds: state of the art. *NDT&E International*, 1996, 29(2), 111-117.
- Aki, K. and Richards, P. G. Quantitative seismology, W. H. Freeman, San Francisco, CA, 1980.
- Miller, G. F. and Pursey, H. On the partition of energy between elastic waves in a semi-infinite solid. *Proceeding Royal Society, London, Series A*, 1955, 233, 55-69.
- Parasnis, D. S. *Principles of Applied Geophysics*, 4th ed., Sciences Paperbacks, London, p. 263, 1986.
- Heisey, J. S., Stokoe II, K. H., Hudson, W. R. and Meyer A. H. Determination of in situ shear wave velocities from spectral analysis of surface waves. Research report 256-2, Center for Transportation Research, University of Texas at Austin, 1982.
- Nazarian, S. and Stokoe II, K. H. In situ determination of elastic moduli of pavements systems by spectral analysis of surface waves method (practical aspect). Research report 368-1F, Center for Transportation Research, University of Texas at Austin, 1985.
- Jongmans, D., Campillo, M. and Demanet, D. The use of surface wave inversion and seismic reflection methods for engineering applications. *Proceedings of the sixth Congress of the International Association of Engineering Geology*, pp 10, Amsterdam, 1990.
- Jongmans, D., Demanet, D., Horrent, C., Campillo, M. and Sánchez-Sesma, F. J. Dynamic soil parameter determination by geophysical prospecting in Mexico City: implication for site effect modelling. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1996, 15, 549-559.
- Tittmann, B. R., Cohen-Tenoudji, F., de Billy, M., Jungman, A. and Quentin, G. A simple approach to estimate the size of small cracks with the use of acoustic surface waves. *Appl. Phys. Lett.*, 1978, 33(1), 6-8.
- Cooper, J. A., Crosbie, R. A., Dewhurst, R. J., McKie, A. D. W. and Palmer, S. B. Surface acoustic wave interactions with cracks and slots: a noncontacting study using lasers. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 1986, UFFC-33(5), 462-470.
- Burger, C. P. and Testa, A. Rayleigh wave spectroscopy to measure the depth of surface cracks. In *Proceedings of the Thirteenth Symposium on Non Destructive Evaluation*, San Antonio, TX, 21-213 April 1981.
- Imram, I., Nazarian, S. and Picornell, M. Crack detection using time domain wave propagation technique. *Jr. Geotech. Eng.*, 1995, 121(2), 198-207.
- Richart, F. E., Hall, J. R. and Woods, R. D. *Vibration of Soils and Foundations*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1970.
- May, T. W. and Bolt, B. A. The effectiveness of trenches in reducing seismic motion. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1982, 10, 195-210.
- Kalinski, M. E. Measurements of intact and cracked concrete structural elements by the SASW methods. Thesis of the University of Texas at Austin, 1994.
- Bard, P. Y. Diffracted waves and displacement field over two-dimensional elevated topographies. *Geophys. J.R. Astr. Soc.*, 1982, 71, 731-760.
- Sánchez-Sesma, F. J. Diffraction of elastic wave by three-dimensional surface irregularities. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1983, 73, 1621-1636.
- Pedersen, H. A., Sánchez-Sesma, F. J. and Campillo, M. Three-dimensional scattering by two dimensional topographies. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1994, 84, 1169-1183.
- Sánchez-Sesma, F. J. and Campillo, M. Topographic effects for incident P SV, and Rayleigh waves. *Tectonophysics*, 1993, 218, 113-125.



Grégoire HÉVIN

**UTILISATION DES ONDES DE SURFACES
POUR L'AUSCULTATION DES
STRUCTURES DU GENIE CIVIL :
APPLICATION A LA CARACTERISATION
DES FISSURES DE SURFACE**

Dans le domaine du génie civil, la demande en matière de contrôle non destructif est croissante. Les ondes de surface, et de Rayleigh en particulier, présentent différentes propriétés intéressantes pour l'auscultation de la surface des structures en béton. L'objectif de ce travail est de proposer et d'évaluer une méthode de caractérisation des fissures de surface par les ondes de Rayleigh.

La diffraction des ondes de Rayleigh par une fissure de surface est modélisée par la méthode indirecte d'éléments de frontière (IBEM pour Indirect Boundary Element Method). Les résultats permettent une analyse fine des différents phénomènes de diffraction et l'élaboration d'une méthode spectrale de détermination de la profondeur des fissures. Des dispositifs et procédures de traitement prenant en compte les effets de la source et des capteurs permettent de l'appliquer expérimentalement. La comparaison des données numériques et expérimentales sur des fissures artificielles de différentes profondeurs valide la méthode.

Elle est alors appliquée à des cas particuliers (fissures remplies d'eau, fissures présentant des contacts entre les deux lèvres) et comparée à une méthode temporelle utilisant les ondes de volume. Les résultats montrent clairement la complémentarité des deux méthodes pour un faible surcoût de mise en œuvre. Leur application à des cas de fissuration réelle sur ouvrage d'art confirme leur complémentarité pour de véritables conditions d'auscultation.

Mots clefs : Ondes de Rayleigh, Contrôle non destructif, fissures de surface, béton, IBEM, génie civil.

Thèse réalisée au

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
Section Reconnaissance et Géophysique
BP 19
44340 BOUGUENAI - France